

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Análise comparativa dos métodos da ISO 13790 e sua
adequabilidade na estimativa das necessidades de energia para
aquecimento e arrefecimento e da temperatura do ar interior**

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Hugo Rafael Nogueira de Almeida

2016

Dissertação orientada por:
Doutora Marta João Nunes Oliveira Panão

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Análise comparativa dos métodos da ISO 13790 e sua
adequabilidade na estimativa das necessidades de energia para
aquecimento e arrefecimento e da temperatura do ar interior**

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Hugo Rafael Nogueira de Almeida

2016

Dissertação orientada por:
Doutora Marta João Nunes Oliveira Panão

Para ti, avô Francisco

RESUMO

A norma europeia EN ISO 13790 é uma ferramenta de referência na caracterização do desempenho térmico dos edifícios.

O trabalho que se apresenta centra-se no estudo de três diferentes métodos de cálculo das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento ambiente apresentados de acordo com as disposições da referida norma: o método quase-estacionário de base sazonal, adotado no Decreto-Lei n.º 118/2013, o método horário denominado de cálculo dinâmico simplificado e o método de simulação dinâmica.

O objetivo do trabalho consistiu na análise comparativa dos resultados das necessidades anuais de energia útil dos métodos estudados, aplicados a uma habitação comum, considerando-se diferentes climas de Portugal e diferentes soluções construtivas tipicamente portuguesas. Procurou-se também fazer uma análise comparativa da sensibilidade desses métodos a alguns parâmetros, designadamente à transferência de calor por transmissão do pavimento (em contacto com o solo) e à transferência de calor por ganhos solares pela envolvente opaca. Estudaram-se ainda as diferenças na modelação da temperatura do ar interior entre o método horário e a simulação dinâmica.

Para uma análise comparativa mais precisa foram efetuadas adaptações, de modo a que os dados de entrada fossem coincidentes para os três métodos de cálculo. Para isso foi necessário ajustar o método sazonal, para permitir a entrada de dados climáticos de base horária, e criar certas restrições ao motor de simulação dinâmica, de forma a garantir que as condições fronteira nas superfícies interiores e exteriores da habitação seguissem as indicações propostas pela norma ISO 13790. Os métodos sazonal e horário foram construídos através da aplicação MS Office Excel 2013 e o método de simulação dinâmica foi reproduzido através da ferramenta computacional *EnergyPlus* v2.07.

Este estudo demonstrou que, em termos de aplicabilidade dos métodos, qualquer um pode ser utilizado para o cálculo das necessidades anuais de energia de uma habitação, na medida em que os resultados obtidos são semelhantes. Contudo, para estudos sobre a variação diária da temperatura do ar interior de uma habitação, o método horário apresenta limitações devidas à modelação da inércia térmica, uma vez que se observam maiores amplitudes térmicas, com um erro médio nos máximos/mínimos diários de cerca de 1 °C de diferença em relação ao *EnergyPlus*.

Palavras-chave:

necessidades de energia, temperatura do ar interior, método sazonal, método horário, *EnergyPlus*.

ABSTRACT

The EN ISO 13790 standard is a reference tool for the characterization of thermal performance of buildings.

This paper discusses the three different calculations methods of energy use for space heating and cooling in accordance to the standard instructions. The calculation methods described in this paper are: A) Seasonal quasi-steady state method; B) Simple hourly method; C) Detailed dynamic simulation method

A comparative analysis of the studied methods, applied to a common building, was undertaken in order to calculate the annual energy needs for heating and cooling, considering different Portuguese climates and different typical Portuguese constructions.

In addition, some simplifications were made on the same calculation methods such as the non-inclusion of heat transfer through soil and also the non-inclusion of heat gains by solar radiation through opaque constructive elements, in order to analyze the method's sensitivity to those adjustments. It was also a matter of study the distinct differences between the hourly method and the dynamic simulation, when it comes to calculating the temperature of indoor air.

According to what was mentioned above, in order to make a comparative analysis that ensures equivalency between the three methods, as much as possible, it is crucial that the entry data is identical while employing all calculation methods. As a result, the calculation procedure for the seasonal method was changed in order to suit the climate data used in the two other methods and the boundary conditions of EnergyPlus were constrained according to the Standard's instructions.

The simplified methods (seasonal and hourly method) were built on MS Office 2013 and the dynamic simulation was created using the detailed simulation program EnergyPlus v.2.03.

In conclusion, with regards to the annual energy requirements calculations, all aforementioned methods are effective as their results were similar. Nevertheless, it should be stressed that there are limitations when the hourly method is applied to analyze the daily variations for the indoor air temperature due to thermal inertia (one overall thermal capacity), considering the fact that larger thermal amplitudes waves are observed, with 1 °C difference error fluctuation on daily temperature peaks in relation to EnergyPlus simulation.

Keywords:

energy requirements, indoor air temperature, seasonal method, hourly method, EnergyPlus.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	2
1.1	Contexto	2
1.2	Objetivos	4
1.3	Estrutura do trabalho	5
2.	CONCEITOS TEÓRICOS	6
2.1	Mecanismos de transferência de calor	7
2.2	Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento	9
2.3	Dados climáticos	9
2.4	Duração da estação de aquecimento e arrefecimento	11
3.	MÉTODOS DE CÁLCULO DAS NECESSIDADES DE ENERGIA	12
3.1	Método sazonal	13
3.1.1	Descrição das variáveis	13
3.1.2	Necessidades de energia útil para aquecimento, N_{iq} , em kWh/m ²	15
3.1.3	Necessidades de energia útil para arrefecimento, N_{rc} , em kWh/m ²	17
3.2	Método horário	18
3.2.1	Descrição das variáveis	20
3.2.2	Resolução numérica	23
3.3	Simulação dinâmica - <i>EnergyPlus</i>	26
3.3.1	Introdução de dados	28
3.3.2	Resultados da simulação	29
4.	METODOLOGIA	30
4.1	Descrição da habitação	30
4.1.1	Localização e clima	31
4.1.2	Geometria do edifício	31
4.1.3	Materiais de construção e vãos envidraçados	32
4.1.4	Sistemas da habitação	34
4.1.5	Síntese das características da habitação	35

4.2	Equivalência entre métodos	36
4.2.1	Método sazonal adaptado ao caso de estudo	36
4.2.2	Método horário adaptado ao caso de estudo	37
4.2.3	<i>EnergyPlus</i> adaptado ao caso de estudo	38
5.	ANÁLISE DE RESULTADOS	44
5.1	Modelo base	44
5.2	Modelo sem ganhos solares opacos	46
5.3	Modelo com pavimento adiabático	48
5.4	Discussão dos resultados das necessidades de energia	49
5.5	Perfis da temperatura do ar interior	51
6.	CONCLUSÕES	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
	ANEXO A	A
	ANEXO B	B
	ANEXO C	C

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – Balanço térmico de uma habitação no inverno (Panão, M., 2013).	7
FIGURA 2 – Os três mecanismos físicos de transferência de calor (Tasa, D., sem data).	8
FIGURA 3 – Representação das necessidades de aquecimento para uma temperatura de <i>set-point</i> interior de 20 °C durante a estação de inverno (Panão, M., 2013).	9
FIGURA 4 – Zonas climáticas de Portugal continental de inverno e verão respetivamente (Despacho n.º 15793-F/2013, 2013).	10
FIGURA 5 – Método horário, denominado em Portugal por “cálculo dinâmico simplificado” reproduzido através do modelo 5R1C (ISO 13790, 2008).	19
FIGURA 6 – Comportamento da temperatura na zona térmica para cada situação (ISO 13790, 2008).	25
FIGURA 7 – Estrutura dos módulos do <i>EnergyPlus</i> (<i>Engineering Reference. Energyplus.net</i> , sem data).	26
FIGURA 8 – Interface do programa <i>EnergyPlus</i> onde é possível selecionar os ficheiros “.IDF” e “.EPW” e executar o comando “IDF Editor”.	27
FIGURA 9 – Folha de cálculo reproduzida pelo <i>EnergyPlus</i> após efetuada a simulação.	29
FIGURA 10 – Aplicação do método sazonal ao caso de estudo construído numa folha de cálculo Excel.	36
FIGURA 11 – Aplicação do método horário ao caso de estudo construído numa folha de cálculo Excel.	38
FIGURA 12 – Visualização gráfica da habitação do caso de estudo no programa <i>OpenStudio SketchUp Plug-In</i> .	39
FIGURA 13 – Definição de valores constantes para os coeficientes de transferência térmica por convecção em conformidade com a Tabela 6.	40
FIGURA 14 – Ficheiros climáticos com temperaturas mensais do solo disponíveis em <i>energyplus.net</i> - Utilização dos ficheiros climáticos marcados a amarelo.	41
FIGURA 15 – Determinação das temperaturas médias mensais do solo (a verde) a partir de outros ficheiros de dados climáticos.	42
FIGURA 16 – Necessidades anuais de aquecimento para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada – Modelo base.	45
FIGURA 17 – Necessidades anuais de arrefecimento para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada – Modelo base.	46
FIGURA 18 – Necessidades anuais de aquecimento para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada – Modelo sem ganhos solares opacos.	47
FIGURA 19 – Necessidades anuais de arrefecimento para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada – Modelo sem ganhos solares opacos.	47

FIGURA 20 – Necessidades anuais de aquecimento para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada – Modelo com pavimento adiabático.	48
FIGURA 21 – Necessidades anuais de arrefecimento para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada – Modelo com pavimento adiabático.	49
FIGURA 22 – Perfil da temperatura do ar interior na segunda semana de outubro para o método horário e <i>EnergyPlus</i>	51
FIGURA 25 – Temperatura interior (°C) - método horário e <i>EnergyPlus</i> – Mês de abril	C
FIGURA 26 – Temperatura interior (°C) - método horário e <i>EnergyPlus</i> – Mês de maio	C
FIGURA 27 – Temperatura interior (°C) - método horário e <i>EnergyPlus</i> – Mês de outubro	C

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1	Parâmetros climáticos de frequência horária disponíveis nos ficheiros .epw e .dat. providenciados pelo LNEG.	11
TABELA 2	Valores padrão de A_m e C_m em função da classe de inércia térmica (ISO 13790, 2008).	21
TABELA 3	Levantamento dimensional da habitação.	31
TABELA 4	Propriedades dos materiais de cada elemento opaco da Solução inicial (do interior para o exterior).	32
TABELA 5	Propriedades dos materiais de cada elemento opaco da Solução melhorada (do interior para o exterior).	32
TABELA 6	Resistências superficiais térmicas com $h_r = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.	33
TABELA 7	Coeficientes de transmissão térmica de cada solução construtiva ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$).	33
TABELA 8	Síntese geral do caso de estudo.	35
TABELA 9	Sensibilidade dos métodos nas necessidades de aquecimento relativamente à alteração de solução construtiva.	45
TABELA 10	Sensibilidade dos métodos face à não inclusão de ganhos solares através dos elementos construtivos opacos.	48
TABELA 11	Sensibilidade dos métodos à alteração para um pavimento adiabático relativamente ao modelo base	49
TABELA 12	Necessidades anuais de energia para aquecimento de todos os modelos para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada, em (kWh/m^2).	A
TABELA 13	Necessidades anuais de energia para arrefecimento de todos os modelos para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada, em (kWh/m^2).	A
TABELA 14	Diferenças entre os resultados das necessidades de aquecimento dos métodos simplificados e do <i>EnergyPlus</i> , em (kWh/m^2).	B
TABELA 15	Diferenças entre os resultados das necessidades de arrefecimento dos métodos simplificados e do <i>EnergyPlus</i> , em (kWh/m^2).	B

ACRÓNIMOS

ISO – *International Organization for Standardization*.

REH - Regulamento de desempenho Energético dos edifícios de Habitação.

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia.

NUTS III – Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos de nível III.

SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética dos Edifícios.

ITE50 – Informação técnica de edifícios - Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente opaca.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

É de conhecimento geral que as consequências eminentes do aquecimento global levaram as principais autoridades internacionais a adotarem um conjunto importante de medidas assentes em três ideias fundamentais:

- ▶ Redução significativa das emissões de gases de efeito de estufa;
- ▶ Incentivo e reforço do uso de fontes de energia renovável;
- ▶ Aumento da eficiência energética, contribuindo para o uso eficiente dos recursos.

A Europa, e em especial Portugal, depende em termos energéticos de outros países fora da União Europeia (UE), alguns dos quais politicamente instáveis, para satisfazer as suas necessidades de combustíveis fósseis. Como tal, por motivos estratégicos a UE instou os seus Estados-Membros a alcançarem os seguintes objetivos energéticos e climáticos até 2020: 20% do consumo de energia satisfeito a partir de fontes de energia renováveis; redução das emissões de gases de efeito de estufa em 20%; adoção de medidas com vista à obtenção de uma poupança energética de 20%.

A eficiência energética figura, por isso, entre os grandes objetivos da UE para 2020. O sector dos edifícios representa aproximadamente 40% da energia total consumida (sobretudo sob a forma de calor), e é responsável por 36% das emissões dos gases com efeito de estufa na UE [Diretiva 2010/31/UE, 2010]. Em Portugal, os edifícios também constituem um setor importante, dado que consomem cerca de 30% da energia primária do país: 12% para os edifícios de serviços e 17% para edifícios residenciais [ADENE, 2012].

Face à preocupação com o consumo energético nos edifícios a UE criou uma série de instrumentos legais no sentido de identificar o desempenho energético dos edifícios e promover medidas de melhoria da racionalização de energia. Uma das mais importantes diretivas europeias relativa ao desempenho energético dos edifícios (EPBD), Diretiva 2002/91/CE, de 16 de dezembro, teve como objetivo padronizar e identificar o desempenho energético dos edifícios através da introdução da Certificação Energética, potenciando poupanças energéticas dos mesmos. Com a publicação da Diretiva 2010/31/EU, de 19 de maio, foi reformulado o regime estabelecido pela Diretiva 2002/91/CE, tendo

sido introduzidas novas disposições com o propósito de reforçar as medidas de promoção do desempenho energético dos edifícios, à luz das metas acordadas pelos Estados-Membros para 2020.

Em Portugal ambas as diretivas referidas foram transpostas para o direito interno, dando origem ao Sistema Nacional de Certificação Energética (SCE). O SCE, estabelecido atualmente pelo Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto (diploma que transpõe a Diretiva 2010/31/EU), contribuiu fortemente para o crescente destaque de temas como a eficiência energética e a utilização de energias renováveis nos edifícios. O SCE integra atualmente o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

A aplicação da Diretiva 2002/91/CE, levou à criação da norma EN ISO 13790:2008 - *Thermal performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling*, como forma de harmonização das metodologias de cálculo para avaliação do desempenho térmico dos edifícios. Estas metodologias de cálculo incidem sobre o consumo de energia para aquecimento e arrefecimento nos edifícios face às condições climáticas exteriores.

De acordo com a norma EN ISO 13790:2008, as necessidades de energia anual de aquecimento e arrefecimento de um edifício podem ser calculadas por três métodos: método de base sazonal (ou mensal), método horário e simulação dinâmica.

Existem outros estudos comparativos dos métodos apresentados na norma ISO 13790. Beccali *et al.* (2001) comparam dois métodos simplificados, semelhantes ao método mensal descrito na norma ISO 13790, com o programa de simulação dinâmica *TRNSYS* para necessidades de arrefecimento em diferentes climas de Itália. Corrado e Fabrizio (2007) também compararam as necessidades de arrefecimento do método mensal com o programa *EnergyPlus* em climas tipicamente italianos. Estes estudos identificaram diferenças significativas entre os resultados dos métodos simplificados e os programas de simulação dinâmica. Kokogiannakis, *et al* (2007) concluíram que, para a maioria dos casos, os métodos simplificados (mensal e horário) apresentam resultados semelhantes aos da simulação dinâmica para as necessidades de aquecimento e arrefecimento. Jacinto (2014) apresentou para as necessidades de aquecimento em climas de Portugal, resultados superiores para o método sazonal em relação ao método horário, com essa diferença a ser atenuada para habitações com tipo de construção mais recente.

A nível nacional são ainda escassos os estudos que comparam os resultados dos três métodos de cálculo acima referidos, para climas e soluções construtivas tipicamente portuguesas, sendo por isso importante desenvolver trabalhos neste domínio, para um maior entendimento das diferenças entre os referidos métodos.

1.2 Objetivos

Esta dissertação foca-se no estudo comparativo dos métodos de cálculo das necessidades anuais de energia para aquecimento e arrefecimento de uma habitação referidos na norma ISO 13790: método de base sazonal (ou mensal), método horário e simulação dinâmica. Constituem objetivos deste trabalho:

- ▶ Através de uma análise comparativa dos resultados dos três métodos de cálculo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, identificar a existência de discrepâncias e semelhanças entre os mesmos, por forma a concluir se os métodos simplificados (sazonal e horário) têm capacidade de reproduzir resultados semelhantes aos do método de simulação dinâmica (*EnergyPlus*) para climas e soluções construtivas tipicamente portuguesas.
- ▶ Para algumas condições de simplificação dos modelos, designadamente a não inclusão da transferência de calor por ganhos solares pela envolvente opaca e a não inclusão da transferência de calor por transmissão do pavimento (em contacto com o solo), identificar possíveis diferenças de sensibilidade entre os métodos através da análise dos resultados das necessidades de aquecimento e arrefecimento, antes e depois das referidas simplificações, no sentido de detetar possíveis fragilidades nos métodos.
- ▶ Estudar a variação diária da temperatura interior da habitação, obtida através da simulação dinâmica do *EnergyPlus* e do método horário, no sentido de identificar a existência de possíveis limitações na sua aplicabilidade.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho encontra-se estruturado por 6 capítulos.

No capítulo 1 consta a introdução, onde é dado a conhecer o assunto investigado e se sintetiza o estado atual da pesquisa e onde se apresentam os objetivos a alcançar e a estrutura do trabalho.

No capítulo 2 definem-se alguns conceitos que suportam o trabalho realizado.

No capítulo 3 são apresentados, os três métodos de cálculo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento ambiente.

No capítulo 4 descreve-se a metodologia adotada, caracterizando-se em detalhe o caso de estudo. Define-se a habitação, descrevendo a geometria, os elementos construtivos, os parâmetros térmicos, sistemas adotados e dados climáticos utilizados. São também, apresentadas as simplificações introduzidas no modelo e nos métodos estudados de forma a garantir o maior número de *inputs* comuns e as mesmas condições fronteira que permitam a assegurar a sua equivalência.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento para cada solução construtiva (“solução inicial” e “solução melhorada”), obtidos pelos três métodos, tendo em conta as regiões climáticas adotadas. Apresentam-se também os resultados da sensibilidade desses métodos às simplificações adotadas nos modelos, designadamente a não inclusão de trocas de calor pelo solo e de ganhos térmicos resultantes da radiação solar absorvida pela envolvente opaca. É ainda objeto de análise o desempenho térmico do modelo em termos de temperatura do ar interior obtida pelos método horário e *EnergyPlus*.

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões finais deste trabalho.

2. CONCEITOS TEÓRICOS

As condições de conforto térmico interior proporcionadas por uma habitação dependem designadamente das suas características arquitetónicas e construtivas e dos seus sistemas de aquecimento e/ou arrefecimento.

As variáveis climáticas que mais influenciam os edifícios em termos de transferência de calor são a temperatura do ar, que determina a transferência de calor entre o interior e o exterior, e a radiação solar recebida, que depende da trajetória do Sol e da duração da exposição solar. Estas duas variáveis promovem ganhos ou perdas térmicas nos edifícios dependendo da estação em questão. No inverno a temperatura exterior é baixa, pelo que predominantemente existem perdas térmicas do interior para o exterior dos edifícios, contudo essas perdas são compensadas pelo contributo da radiação solar para o aumento da temperatura interior. No verão, para além da radiação solar constituir uma fonte de calor a evitar, em alguns períodos, a temperatura mais elevada no exterior promove a transferência de calor do exterior para o interior dos edifícios, contribuindo assim, ambos os fatores, para o aumento indesejado da temperatura interior nos edifícios.

As características dos elementos construtivos que fazem de fronteira entre a habitação e o ambiente exterior (fachadas, janelas, coberturas, entre outros) influenciam também as condições de conforto no seu interior, onde a inércia térmica e o isolamento térmico do material são os principais fatores de otimização passiva do desempenho térmico da habitação. A inércia térmica é superior para materiais de elevada massa e calor específico, sendo um indicador da capacidade da habitação para armazenar energia sob a forma de calor. Quando essa é elevada verifica-se uma atenuação dos valores mínimos e máximos para a temperatura do ar interior. O nível de isolamento térmico determina a capacidade de reduzir a transferência de calor por condução entre o exterior e o interior de um edifício, o que, contribui para um melhor desempenho térmico.

Quando as características passivas do edifício não são suficientes para atingir o conforto térmico desejado, recorre-se a sistemas de aquecimento e arrefecimento para satisfazer essa necessidade, uma vez que estes proporcionam, normalmente, de forma constante, a temperatura desejada pelos residentes. A quantidade de energia necessária para atingir esse conforto dependerá do clima exterior, das características do edifício e também do desempenho energético desses sistemas. Para selecionar o equipamento necessário para garantir as condições de conforto térmico ambiente, com o menor consumo possível, é conveniente conhecer as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento ambiente.

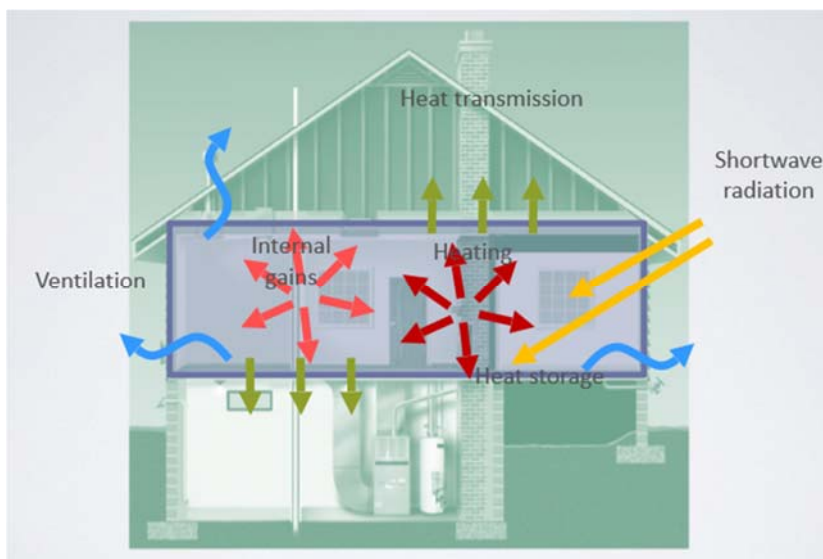


FIGURA 1 – Balanço térmico de uma habitação no inverno (Panão, M., 2013).

Na Figura 1 apresenta-se um exemplo do balanço térmico de uma habitação. Este balanço é a soma de todos os ganhos e perdas da zona térmica¹.

Como o desempenho térmico do edifício é determinado pelo seu balanço de energia é necessário promover ou reduzir os diferentes fluxos de calor em função da estação do ano. No inverno é importante promover os ganhos solares mas também minimizar as perdas por transmissão bem como as infiltrações de ar. Por outro lado, no verão minimizam-se os “ganhos” solares e promovem-se as perdas por transmissão e ventilação.

2.1 Mecanismos de transferência de calor

Sempre que existe uma diferença de temperatura entre meios diferentes, ocorre, necessariamente, transferência de calor no sentido decrescente da temperatura. A transferência de calor retratada pelos diferentes fluxos de calor, que determinam o balanço térmico, ocorre através de três mecanismos físicos:

- ▶ **Condução:** Transmissão de agitação térmica molecular entre moléculas adjacentes;
- ▶ **Convecção:** Movimento coerente de partículas de fluido para zonas diferentes de temperatura;

¹ Espaço ou conjunto de espaços passíveis de serem considerados em conjunto devido às suas similaridades em termos de perfil de utilização, iluminação e equipamentos, ventilação mecânica e sistema de climatização e, quanto aos espaços climatizados, igualmente devido às similaridades em termos de condições de exposição solar.

► **Radiação:** Troca de radiação térmica por fótons.

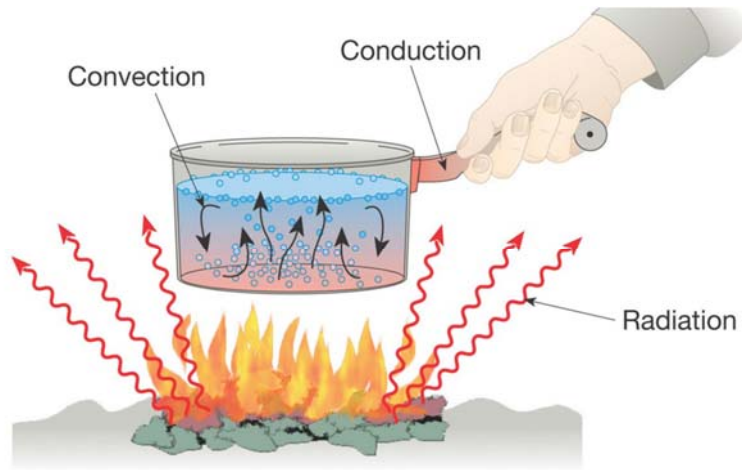


FIGURA 2 – Os três mecanismos físicos de transferência de calor (Tasa, D., sem data).

A quantidade de calor que atravessa a área de um determinado elemento pode ser traduzida matematicamente, de uma forma elementar, através das seguintes equações para cada mecanismo de transferência de calor:

$$Q_{cond} = k \frac{\Delta T}{L} A = h_{cond} \Delta T A = H \Delta T \quad (1)$$

$$Q_{conv} = h_{conv} \Delta T A = H \Delta T \quad (2)$$

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) A \approx h_{rad} (T_s - T_{sur}) A = H \Delta T \quad (3)$$

Onde:

Q_{cond} é o fluxo de calor por condução, em W;

k é a condutividade térmica do material, em W/(m.K);

L é espessura do material que o fluxo de calor atravessa, em m;

h_{cond} é o coeficiente de transferência de calor por condução, em W/(m²K);

Q_{conv} é o fluxo de calor por convecção, em W;

h_{conv} é o coeficiente de transferência de calor por convecção, em W/(m²K);

Q_{rad} é o fluxo de calor por radiação, em W;

ε é a emissividade do material;

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ é a constante de Stefan-Boltzmann, em W/(m²K⁴);

T_s é a temperatura absoluta da superfície, em K;

T_{sur} é a temperatura absoluta equivalente do céu, em K;

ΔT é a diferença de temperatura entre os elementos, em K;

H é a condutância de transferência de calor, em W/K;

A é a área do elemento que o fluxo de calor atravessa, em m².

De uma forma simplificada são estas as equações fisicamente representativas dos três modos de transferência de calor presentes em qualquer edifício, que permitem quantificar os principais fluxos e fontes de calor e calcular o balanço de energia térmica através de diferentes métodos de cálculo.

2.2 Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento

A análise do comportamento térmico de um edifício, independentemente do método utilizado, é realizada através de equações de equilíbrio entre ganhos e perdas térmicas, com a temperatura do ar interior assumida como constante de modo a garantir as exigências de conforto térmico dos seus ocupantes, permitindo desta forma obter as necessidades de energia para aquecimento ou arrefecimento do edifício.

Dado o exposto, percebe-se que as necessidades de energia para aquecimento ou arrefecimento traduzem-se na quantidade de energia útil necessária para manter em permanência um edifício a uma determinada temperatura interior de referência, durante a estação de aquecimento ou arrefecimento.

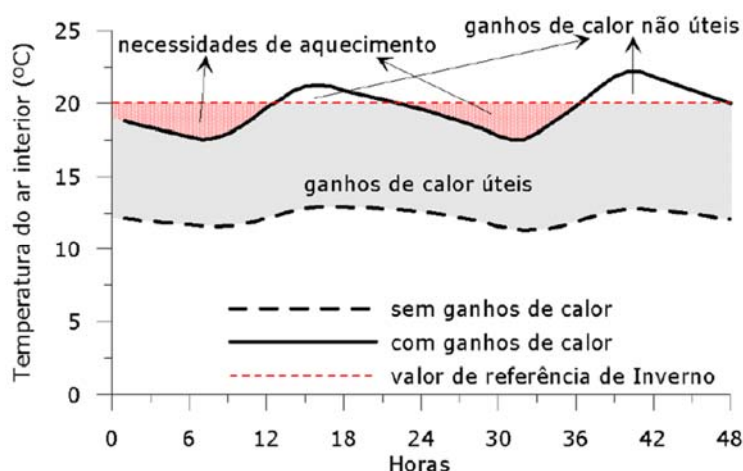


FIGURA 3 – Representação das necessidades de aquecimento para uma temperatura de *set-point* interior de 20 °C durante a estação de inverno (Panão, M., 2013).

2.3 Dados climáticos

Os dados climáticos relevantes para cálculo das necessidades de energia para climatização de edifícios são dados referentes ao clima de cada região ou localidade, destacando-se nomeadamente a temperatura do ar exterior e as variáveis relativas à radiação solar existente.

Em Portugal foi estabelecido um zonamento climático baseado na Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos de nível III (NUTS III) que divide o continente em trinta zonas onde cada uma delas é classificada por níveis de severidade climática de inverno e de verão (Figura 4).

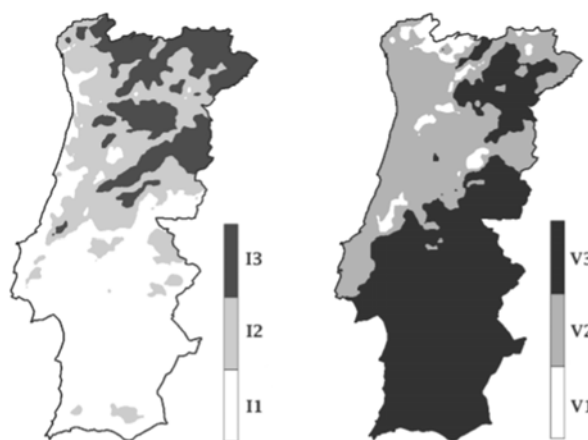


FIGURA 4 – Zonas climáticas de Portugal continental de inverno e verão respetivamente (Despacho n.º 15793-F/2013, 2013).

Os dados climáticos para cada zona das NUTS III (providenciados pelo LNEG) são apresentados de diferentes formas consoante a metodologia adotada para o cálculo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento. Para o método sazonal, os dados para cada localização podem ser obtidos através da consulta dos valores de referência de parâmetros climáticos para cada zona da NUTS III, publicados no Despacho n.º 15793-F/2013, nomeadamente a duração da estação de aquecimento, a radiação média mensal a sul, o número de graus-dia de aquecimento ou a temperatura média do ar exterior da estação de arrefecimento. Para métodos mais complexos, tal como o método horário ou a simulação dinâmica, o LNEG criou uma aplicação implementada em MS Office 2010 Excel que fornece dados climáticos de base horária relativos ao período de um ano. Os formatos de ficheiros meteorológicos disponíveis nesta aplicação são ".EPW" (*ESP-r/EnergyPlus Weather format*) para simulação dinâmica geral, e ".DAT" adequado a cálculo dinâmico simplificado (método horário), com temperatura e radiação solar na horizontal e em 8 superfícies verticais. A Tabela 1 apresenta os parâmetros climáticos presentes nos referidos tipos de ficheiros.

TABELA 1

Parâmetros climáticos de frequência horária disponíveis nos ficheiros .epw e .dat. providenciados pelo LNEG.

Tipo de ficheiro climático	.epw	.dat
Temperatura do ar seco (°C)	✓	✓
Temperatura de ponto de orvalho (°C)	✓	---
Humidade relativa (%)	✓	✓
Pressão atmosférica (Pa)	✓	---
Radiação horizontal extraterrestre (Wh/m ²)	✓	---
Radiação direta normal extraterrestre (Wh/m ²)	✓	---
Radiação infravermelha celeste (Wh/m ²)	✓	---
Radiação global horizontal (Wh/m ²)	✓	✓
Radiação direta normal (Wh/m ²)	✓	---
Radiação difusa horizontal (Wh/m ²)	✓	✓
Radiação solar global recebida em superfícies verticais orientadas nas oito direções: N, NE, E, SE, S, SW, W, NW (Wh/m ²)	---	✓
Variáveis relacionadas com a iluminância	✓	---
Direção do vento (°)	✓	✓
Magnitude do vento (m/s)	✓	✓
Outras variáveis	✓	---

2.4 Duração da estação de aquecimento e arrefecimento

A duração da estação de aquecimento e arrefecimento dependem do clima e da metodologia adotada para o cálculo das necessidades de energia. Em Portugal, para o método sazonal, a duração da estação é um valor tabelado em função da localidade pretendida e pode ser consultada no Despacho n.º 15793-F/2013. Para os outros métodos mais complexos (como o horário e a simulação dinâmica) existe um procedimento descrito no Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de abril que permite determinar a data inicial e final da duração da estação de aquecimento para cada clima através dos dados climáticos relativos à temperatura exterior:

«Estação convencional de aquecimento» é o período do ano com início no primeiro decêndio posterior a 1 de outubro em que, para cada localidade, a temperatura média diária é inferior a 15 °C e com termo no último decêndio anterior a 31 de maio em que a referida temperatura ainda é inferior a 15 °C.»

«Estação convencional de arrefecimento» é o conjunto dos quatro meses de verão (junho, julho, agosto e setembro) em que é maior a probabilidade de ocorrência de temperaturas exteriores elevadas que possam exigir arrefecimento ambiente em edifícios com pequenas cargas internas.» [Decreto-Lei n.º 80/2006, 2006: p. 2476]

3. MÉTODOS DE CÁLCULO DAS NECESSIDADES DE ENERGIA

A Diretiva 2002/91/CE, de 16 de dezembro, relativa ao desempenho energético dos edifícios, foi o principal instrumento legislativo da UE que levou à implementação de medidas para a melhoria do comportamento térmico nos edifícios. Para implementar essa diretiva foi necessário aplicar algumas normas, nomeadamente a ISO 13790 “*Thermal performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling*”.

Como anteriormente referido, esta norma apresenta e descreve três métodos de cálculo das necessidades nominais de energia para aquecimento e arrefecimento ambiente:

- ▶ Método quase-estacionário de balanço de energia de base mensal ou sazonal;
- ▶ Método horário simplificado que utiliza um esquema elétrico para calcular as necessidades de modo iterativo de hora em hora;
- ▶ Simulação dinâmica que avalia o comportamento transiente dos edifícios através de programas computacionais.

Em Portugal, do ponto de vista do enquadramento legislativo é possível descrever os três métodos da seguinte forma:

- ▶ O método quase-estacionário de base sazonal referido na norma ISO 13790 foi adotado e integrado no novo regulamento térmico para edifícios de habitação, REH, através do Decreto-Lei n.º 118/2013 com parâmetros para o zonamento climático e respetivos dados definidos e tabelados a nível nacional;
- ▶ O método horário referido na norma ISO 13790, trata-se de um método mais complexo do que o método sazonal. Foi também adotado por Portugal com a denominação de cálculo dinâmico simplificado, conforme preconizado no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), este método utiliza os dados climáticos disponibilizados pelo LNEG para a simulação dinâmica;
- ▶ A simulação dinâmica no contexto legislativo português é normalmente usada para os Grandes Edifícios de Serviços (GES) que tenham a necessidade de modelar várias zonas térmicas com diferentes variações horárias de cargas internas.

Embora o objeto de aplicação dos diferentes métodos seja distinto na legislação nacional, neste trabalho utilizam-se todos os métodos aplicados a um edifício de habitação, simplificado a uma única zona térmica.

3.1 Método sazonal

Esta metodologia, utilizada para determinar as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento e arrefecimento ambiente, encontra-se descrita no Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e no Despacho nº 15793-I/2013, aprovados pelo Decreto-Lei nº 118/2013, em concordância com a norma europeia EN ISO 13790. Este método analisa o balanço total de ganhos e perdas térmicas do local por forma a manter em regime permanente o edifício a uma determinada temperatura interior de referência na estação de aquecimento e arrefecimento.

3.1.1 Descrição das variáveis

As equações das variáveis não apresentadas neste subcapítulo podem ser consultadas no Despacho n.º 15793-K/2013, uma vez que optou-se por apresentar apenas as mais relevantes para o cálculo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento referentes ao caso de estudo descrito no capítulo 4 deste trabalho.

Coefficiente global de transferência de calor por transmissão, H_{tr} , em W/K

$$H_{tr} = H_{ext} + H_{ecs} + H_{enu} + H_{adj} \quad (4)$$

Onde,

H_{ext} é o coeficiente de transferência de calor por transmissão através de elementos da envolvente em contacto com o exterior, compreendendo paredes, envidraçados e coberturas, em W/K dado pela equação (5);

H_{ecs} é o coeficiente de transferência de calor por transmissão através de elementos em contacto com o solo, expresso em W/K, calculado de acordo com a metodologia descrita na norma EN ISO 13370, dado pela equação (6);

H_{enu} é o coeficiente de transferência de calor por transmissão através de elementos da envolvente em contacto com espaços não uteis, expresso em W/K;

H_{adj} é o coeficiente de transferência de calor por transmissão através de elementos em contacto com edifícios adjacentes, expresso em W/K.

$$H_{ext} = \sum_i U_i A_i + \sum_j \psi_j B_j \quad (5)$$

Onde,

U_i é o coeficiente de transmissão térmica do elemento i da envolvente, expresso em W/(m²K);

A_i é a área do elemento i da envolvente, expresso em m²;

ψ_j é o coeficiente de transmissão térmica da ponte térmica linear j , expresso em W/(m.K);

B_j é o desenvolvimento linear da ponte térmica linear j , expresso em m.

$$H_{ecs} = \sum_i U_{bf,i} A_{p,i} + \sum_j z_j P_j U_{bw,j} \quad (6)$$

Onde,

$U_{bf,i}$ é o coeficiente de transmissão térmica do pavimento equivalente, expresso em W/(m²K);

$A_{p,i}$ é a área do pavimento i em contacto com o solo, expresso em m²;

z_j é a profundidade média enterrada da parede em contacto com o solo j , expresso em m. Para pavimentos térmicos, $z=0$;

P_j é o desenvolvimento total da parede em contacto com o solo j , expresso em m;

$U_{bw,j}$ é o coeficiente de transmissão térmica da parede em contacto com o solo j , expresso em W/(m²K).

Coeficiente de transferência de calor por ventilação, H_{ve} , em W/K

$$H_{ve} = 0.34 R_{ph} A_p P_d \quad (7)$$

Onde,

R_{ph} é a taxa nominal de renovação de ar interior, expressa em h⁻¹;

A_p é a área útil de pavimento, expressa em m²;

P_d é o pé direito médio da zona térmica, expresso em m.

Classe de inércia térmica

O parâmetro a traduz a influência da classe de inércia térmica sendo igual a um dos seguintes valores:

- ▶ 1,8 corresponde a edifícios com uma inércia térmica fraca;
- ▶ 2,6 corresponde a edifícios com uma inércia térmica média;
- ▶ 4,2 corresponde a edifícios com uma inércia térmica forte.

Estes valores expressos em W/°C, são determinados conforme a tabela 11 do Despacho n.º 15793-K/2013 referente à relação entre o valor da massa superficial útil por superfície de área de pavimento e a classe de inércia térmica.

Fator de utilização de ganhos

- Se $\gamma \neq 1$ e $\gamma > 0$

$$\eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} \quad (8)$$

- Se $\gamma = 1$

$$\eta = \frac{a}{a + 1} \quad (9)$$

- Se $\gamma < 0$

$$\eta = \frac{1}{\gamma} \quad (10)$$

Em que,

$$\gamma = \frac{Q_g}{Q_{tr} + Q_{ve}} \quad (11)$$

Onde,

Q_g são os ganhos térmicos brutos, em kWh;

Q_{tr} é o coeficiente de transferência de calor por transmissão através da envolvente dos edifícios, em kWh;

Q_{ve} é o coeficiente de transferência de calor por ventilação, em kWh.

3.1.2 Necessidades de energia útil para aquecimento, N_{ic} , em kWh/m²

$$N_{ic} = (Q_{tr} + Q_{ve} - Q_{gu})/A_f \quad (12)$$

Onde,

Q_{tr} é a transferência de calor por transmissão através da envolvente dos edifícios, em kWh, dada pela equação (13);

Q_{ve} é a transferência de calor por ventilação através da envolvente dos edifícios, em kWh, dada pela equação (14);

Q_{gu} são os ganhos térmicos uteis resultantes dos ganhos solares, em kWh, dada pela equação (15);

A_f é a área útil de pavimento da zona térmica medida pelo interior, em m².

Transferência de calor por transmissão através da envolvente, em kWh

$$Q_{tr} = 0.024GD H_{tr} \quad (13)$$

Onde,

GD representa o número de graus dias de aquecimento, em °C/dias, dado pelos valores de referência da tabela 04 do Despacho n.º 15793-F/2013;

H_{tr} é o coeficiente global de transferência de calor por transmissão, em W/K, dado pela equação (4).

Transferência de calor por ventilação, em kWh

$$Q_{ve} = 0.024GD H_{ve} \quad (14)$$

Onde,

H_{ve} é o coeficiente de transferência de calor por ventilação, em W/K, dada pela equação (7).

Ganhos térmicos úteis, em kWh

$$Q_{gu} = \eta_i Q_g \quad (15)$$

Onde,

Q_g são os ganhos térmicos brutos, em kWh, dado pela equação (16);

η_i representa o fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento dado pelas equações de (8) a (10).

Ganhos térmicos brutos, em kWh

$$Q_g = Q_{int} + Q_{sol} \quad (16)$$

Onde,

Q_{int} são os ganhos associados a fontes internas, em kWh;

Q_{sol} são ganhos associados ao aproveitamento da radiação solar, em kWh, dada pela equação (17).

Ganhos solares, em kWh

$$Q_{sol} = G_{sul} \sum_j \left(X_j \sum_n F_{s,i_{nj}} A_{s,i_{nj}} \right) M \quad (17)$$

Onde,

G_{sul} é o valor médio mensal de radiação solar média incidente na superfície vertical orientada a Sul, expresso em kWh/(m²mês);

X_j é o fator de orientação para as diferentes exposições de acordo com a tabela 01 do Despacho n.º 15793-I/2013;

$F_{s,i_{nj}}$ é o fator de obstrução do vão envidraçado n com orientação j , caso não haja obstruções este parâmetro é igual a 1;

$A_{s,i_{nj}}$ é a área efetiva coletora de radiação solar da superfície n com orientação j , em m².

Área efetiva coletora

$$A_{s,i} = A_{win} F_g g_i \quad (18)$$

Onde,

A_{win} é a área total do vão envidraçado, em m²;

F_g é a fração envidraçada do vão envidraçado;

g_i é o fator solar.

3.1.3 Necessidades de energia útil para arrefecimento, N_{vc} , em kWh/m²

$$N_{vc} = (1 - \eta_v) Q_g / A_p \quad (19)$$

Onde,

η_v é o fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento;

Q_g são os ganhos térmicos brutos, em kWh;

A_p é a área interior útil de pavimento do edifício, em m².

Transferência de calor por transmissão através da envolvente, em kWh

$$Q_{tr} = H_{tr} (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) L_v / 1000 \quad (20)$$

Onde,

H_{tr} é o coeficiente global de transferência de calor por transmissão, em W/K, dada pela equação (4);

$\theta_{v,ref}$ é a temperatura de referência na estação de arrefecimento, em °C;

$\theta_{v,ext}$ é a temperatura exterior média durante a estação de arrefecimento, em °C;

L_v é a duração da estação de arrefecimento igual a 2928 horas.

Transferência de calor por ventilação, em kWh

$$Q_{ve} = H_{ve} (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) L_v / 1000 \quad (21)$$

Onde,

H_{ve} é o coeficiente de transferência de calor por ventilação, em W/K, dada pela equação (7);

Ganhos térmicos, em kWh

$$Q_{g,v} = Q_{int,v} + Q_{sol,v} \quad (22)$$

Onde,

$Q_{int,v}$ são os ganhos térmicos associados a fontes internas de calor, em kWh;

$Q_{sol,v}$ são os ganhos térmicos associados à radiação solar incidente na envolvente exterior, em kWh;

Ganhos solares, em kWh

$$Q_{sol} = \sum_j \left(G_{sol,j} \sum_n F_{s,i_{nj}} A_{s,i_{nj}} \right) \quad (23)$$

Onde,

$G_{sol,j}$ é o valor médio de radiação solar média incidente na superfície vertical com orientação j , expresso em kWh/m²;

$F_{s,i_{nj}}$ é o fator de obstrução da superfície n com orientação j , caso não haja obstruções este parâmetro é igual a 1;

$A_{s,i_{nj}}$ é a área efetiva coletora de radiação solar da superfície n com orientação j , em m².

Área efetiva coletora

$$A_{s,i} = A_w F_{gi} + \alpha R_{se} U_{op} A_{op} \quad (24)$$

Onde,

α é a absorvidade do material exterior do elemento da envolvente opaca i ;

R_{se} é a resistência superficial exterior do elemento da envolvente opaca i , em m²K/W;

U_{op} é o coeficiente de transferência térmica do elemento da envolvente opaca i , em W/(m²K);

A_{op} é a área superficial do elemento da envolvente opaca i , em m².

3.2 Método horário

Este método consiste numa simplificação de uma simulação dinâmica que traduz o balanço térmico do edifício tendo em conta o calor armazenado ou libertado pela massa térmica dos elementos de construção, considerada como um único elemento agregador (*lumped*), usando intervalos de tempo de uma hora.

Este método aproxima uma zona térmica a um circuito térmico em que se estabelece a equivalência entre corrente elétrica e fluxos de calor sendo, por isso, possível representá-lo na forma de um esquema elétrico constituído por 5 resistências e 1 capacitância (Figura 5).

3.2.1 Descrição das variáveis

As equações das variáveis não apresentadas neste subcapítulo podem ser consultadas na norma ISO 13790, uma vez que optou-se por apresentar apenas as mais relevantes para o cálculo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento referentes ao caso de estudo descrito no capítulo 4 deste trabalho.

Coefficiente de transferência de calor por ventilação, H_{ve} , em W/K

$$H_{ve} = \rho_a c_a \dot{V}_{ve} / 3600 \quad (25)$$

Onde,

$\rho_a c_a$ representa a capacidade calorífica por unidade de volume de ar de valor constante igual a 1200 J/(m³ K);
 \dot{V}_{ve} é o caudal de ventilação, em m³/h dado pela equação (26) caso o fluxo de ar em estudo seja por infiltração.

$$\dot{V}_{ve} = R_{ph} A_f P_d \quad (26)$$

Onde,

R_{ph} é a taxa de renovação nominal do ar interior, em h⁻¹;
 A_f é a área útil de pavimento, em m²;
 P_d é o pé direito médio, em m.

Armazenamento térmico

$$C_m = \sum k_j A_j \quad (27)$$

Onde,

C_m é capacitância térmica, expressa em J/K;
 A_j é a área de contacto com o volume interior do elemento j, expressa em m²;
 k_j é a capacidade térmica, expressa em J/(m²K) do elemento de construção dada pela equação (28) e determinada de acordo com a cláusula 7 da norma ISO 13790, com uma espessura máxima efetiva do elemento de construção de 0,10 m correspondentes à espessura efetiva para o período de um dia.

$$k_j = \sum \rho_i c_i d_i \quad (28)$$

Onde,

ρ_i é a massa volúmica do material, em kg/m³;
 c_i é o calor específico do material, em J/(kg K);
 d_i é a espessura do material, em m.

$$A_m = C_m^2 / (\sum A_j k_j^2) \quad (29)$$

Onde,

A_m é a área de massa efetiva dos elementos em contacto com a zona térmica, expresso em m².

Opcionalmente podemos usar valores padrão de C_m e A_m apresentados na Tabela 2, em função da área de pavimento, A_f , de acordo com a classe de inércia do edifício:

TABELA 2

Valores padrão de A_m e C_m em função da classe de inércia térmica (ISO 13790, 2008).

Classe de inércia	C_m (kJ/K)	A_m (m ²)
Muito leve: 1	80. A_f	2,5. A_f
Leve: 2	110. A_f	2,5. A_f
Média: 3	165. A_f	2,5. A_f
Forte: 4	260. A_f	2,5. A_f
Muito forte: 5	370. A_f	2,5. A_f

Coefficiente de transferência de calor por transmissão através de elementos opacos, $H_{tr,op}$, em W/K

$$H_{tr,op} = \sum A_{op} U_{op} \quad (30)$$

Onde,

A_{op} é a área de superfície do elemento construtivo, expressa em m²;

U_{op} é o coeficiente de transmissão térmica do elemento construtivo², expresso em W/(m²K);

Tal como representado na Figura 5, o coeficiente acima referido está distribuído por duas conduções, $H_{tr,ms}$ e $H_{tr,em}$.

$$H_{tr,ms} = h_{ms} A_m \quad (31)$$

Onde,

h_{ms} é o coeficiente de transmissão de calor entre os nodos ϑ_m e ϑ_s de valor igual a 9,1 W/(m²K) segundo a norma ISO 13790;

A_m é a área de massa térmica determinada pela equação (29).

² Para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica de elementos em contacto com o solo, torna-se necessário seguir as indicações da norma ISO 13790.

$$H_{tr,em} = \left(\frac{1}{H_{tr,op}} - \frac{1}{H_{tr,ms}} \right)^{-1} \quad (32)$$

Coefficiente de transferência de calor por transmissão térmica através de vãos envidraçados, $H_{tr,w}$, em W/K

$$H_{tr,w} = \sum A_w U_w \quad (33)$$

Onde,

A_w é a área de vãos envidraçados, expressa em m²;

U_w é o coeficiente de transmissão térmica do elemento envidraçado, expresso em W/(m²K).

Coefficiente de transferência de calor entre as temperaturas interior e de estrela, $H_{tr,is}$, em W/K

$$H_{tr,is} = h_{is} A_T \quad (34)$$

Onde,

h_{is} é o coeficiente de transmissão de calor entre os nodos ϑ_{air} e ϑ_{sr} , de valor igual a 3,45 W/(m²K), segundo a norma ISO 13790;

A_T é a área total das superfícies em contacto com a zona interior, em m². Segundo a norma esta é dada por $A_T = \Lambda_{at} A_f$, onde Λ_{at} é a razão entre a soma das áreas das superfícies interiores dos elementos com inércia térmica e a área do pavimento, assumindo o valor de 4,5.

Ganhos térmicos

Constituído por ganhos associados a fontes de calor internas e aproveitamento da radiação solar, calculados para cada hora por Φ_{int} e Φ_{sol} respetivamente e expressos em W/m².

$$\Phi_{sol} = I_{sol,j} \sum_k (F_{sh,k} A_{sol,k}) \quad (35)$$

Onde,

$I_{sol,j}$ é a energia média de radiação solar incidente numa superfície k com uma dada orientação j , em W/m²;

$F_{sh,k}$ é o fator de sombreamento por elementos exteriores que causam a redução da área de recolha eficaz de energia solar numa superfície k , com o valor de 0 caso a superfície esteja totalmente sombreada e com valor de 1 caso não haja sombreamento;

$A_{sol,k}$ é a área efetiva de recolha de energia solar da superfície do elemento k , em m², podendo esta ser opaca ou translúcida retratada respetivamente pelas equações (36) e (37).

$$A_{sol,k} = \alpha U_{op} A_{op} R_{se} \quad (36)$$

Onde,

α é o coeficiente adimensional de absorção solar da superfície do elemento opaco;

U_{op} é o coeficiente de transmissão térmica do elemento opaco, em W/(m²K);

A_{op} é a área do elemento opaco, em m²;

R_{se} é a resistência térmica superficial exterior do elemento opaco.

$$A_{sol,k} = F_{sh,gl} g_{gl} (1 - F_F) A_w \quad (37)$$

Onde,

$F_{sh,gl}$ é o fator de redução de sombreamento para dispositivos móveis;

g_{gl} é o fator solar do vidro;

F_F é a fração de área correspondente ao caixilho;

A_w é a área total do vão envidraçado, em m².

3.2.2 Resolução numérica

Cálculo da taxa de energia térmica proveniente de fontes de calor internas e ganhos solares

Os ganhos térmicos de fontes internas e de aproveitamento da radiação solar distribuem-se pelos três nós de temperatura. A taxa de calor, expressa em W/m² de pavimento, à entrada de cada um dos três nodos do modelo 5R1C é determinada respetivamente pelas seguintes equações:

$$\Phi_{ia} = 0,5\Phi_{int} \quad (38)$$

$$\Phi_m = \frac{A_m}{A_T} (0,5\Phi_{int} + \Phi_{sol}) \quad (39)$$

$$\Phi_{st} = \left(1 - \frac{A_m}{A_T} - \frac{H_{tr,w}}{9,1A_T}\right) (0,5\Phi_{int} + \Phi_{sol}) \quad (40)$$

Cálculo das temperaturas ϑ_m , ϑ_s e ϑ_{air}

Todas as temperaturas do modelo são temperaturas médias num intervalo de tempo de uma hora, à exceção de $\vartheta_{m,t}$ e $\vartheta_{m,t-1}$, que representam valores instantâneos das temperaturas de massa no fim e início de cada intervalo temporal, com $\vartheta_{m,t}$ calculado através da temperatura no instante anterior $\vartheta_{m,t-1}$, expresso em °C, dado pela seguinte equação:

$$\theta_{m,t} = \frac{\theta_{m,t-1} \left(\frac{C_m}{3600} - 0,5(H_{tr,3} + H_{tr,em}) \right) + \Phi_{mtot}}{\frac{C_m}{3600} - 0,5(H_{tr,3} + H_{tr,em})} \quad (41)$$

Onde $\Phi_{m,tot}$ é determinado pela seguinte equação, expresso em W/m²

$$\begin{aligned} \Phi_{m,tot} = & \Phi_m + H_{tr,em} \theta_e \\ & + H_{tr,3} \frac{\Phi_{st} + H_{tr,w} \theta_e + H_{tr,1} \frac{\Phi_{ia} + \Phi_{HC,nd}}{H_{ve}} + \theta_{sup}}{H_{tr,2}} \end{aligned} \quad (42)$$

Em que,

$$H_{tr,1} = \left(\frac{1}{H_{ve}} + \frac{1}{H_{tr,is}} \right)^{-1} \quad (43)$$

$$H_{tr,2} = H_{tr,1} + H_{tr,w} \quad (44)$$

$$H_{tr,3} = \left(\frac{1}{H_{tr,2}} + \frac{1}{H_{tr,ms}} \right)^{-1} \quad (45)$$

Onde,

$H_{tr,1}$, $H_{tr,2}$ e $H_{tr,3}$ são condutâncias expressas em W/K.

Deste modo, é possível, em cada intervalo de tempo, determinar a temperatura de cada nó em graus Celsius pelas seguintes equações:

$$\theta_m = \frac{\theta_{m,t} + \theta_{m,t-1}}{2} \quad (46)$$

$$\theta_s = \frac{H_{tr,ms} \theta_m + \Phi_{st} + H_{tr,w} \theta_e + H_{tr,1} \left(\theta_{sup} + \frac{\Phi_{ia} + \Phi_{HC,nd}}{H_{ve}} \right)}{H_{tr,is} + H_{ve}} \quad (47)$$

$$\theta_{air} = \frac{H_{tr,is} \theta_s + H_{ve} \theta_{sup} + \Phi_{ia} + \Phi_{HC,nd}}{H_{tr,is} + H_{ve}} \quad (48)$$

Cálculo da potência necessária de aquecimento e arrefecimento, $\Phi_{HC,nd}$, em W/m²

O algoritmo do modelo, representado na Figura 6 determina a potência de aquecimento e arrefecimento para um determinado valor de temperatura interior do edifício (ou zona) através de três situações possíveis:

- Situação 1 e 2 (ver Figura 6): Se a temperatura interior, for inferior à temperatura de referência (*set-point*) estabelecida para aquecimento, $\theta_{int,set,H}$, o aquecimento é ligado aumentando assim a temperatura no interior da zona;

- Situação 3 (ver Figura 6): Quando a temperatura interior for superior ao valor de referência para aquecimento e inferior ao valor de referência para arrefecimento, o edifício não requer necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento;
- Situação 4 e 5 (ver Figura 6): Se a temperatura interior for maior que o valor de referência para arrefecimento, $\theta_{int,set,C}$, é necessário ligar o arrefecimento.

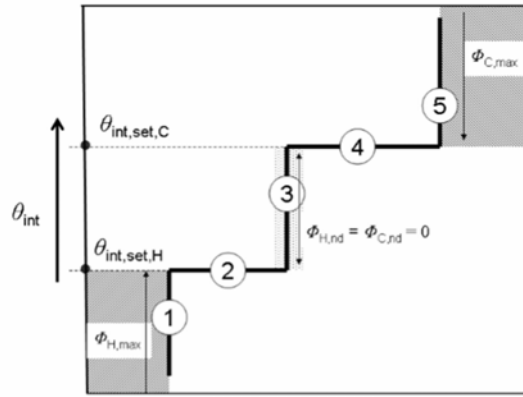


FIGURA 6 – Comportamento da temperatura na zona térmica para cada situação (ISO 13790, 2008).

O controlo de temperatura, para cada intervalo de tempo tem em conta o cálculo da temperatura interna atual, $\vartheta_{int,ac}$, e a potência de aquecimento e arrefecimento atual, $\Phi_{HC,nd,ac}$. Esse controlo é executado para cada iteração através do seguinte procedimento:

1. Verificar se existe necessidade de aquecimento ou arrefecimento.

Considera-se $\Phi_{HC,nd} = 0$ e resolve-se o conjunto de equações (43) a (48), para facilitar os cálculos atribui-se à ϑ_{air} calculada a designação de $\vartheta_{air,0}$. Se $\vartheta_{int,set,H} \leq \vartheta_{air,0} \leq \vartheta_{int,set,C}$ não é necessário aquecimento ou arrefecimento e tem-se que $\Phi_{HC,nd,ac} = 0$ e $\vartheta_{air,ac} = \vartheta_{air,0}$. Caso esta condição não se verifique passamos à seguinte situação.

2. Selecionar a temperatura de *set-point* e calcular as necessidades de aquecimento ou arrefecimento. Resolvem-se as equações (43) a (48), assumindo que $\Phi_{HC,nd} = \Phi_{HC,nd,10}$ com $\Phi_{HC,nd,10} = 10A_f$ e atribui-se ao ϑ_{air} calculado a designação de $\vartheta_{air,10}$ (sendo esta temperatura interior obtida para uma potencia de aquecimento de 10 W/m²). Caso $\vartheta_{air,0} > \vartheta_{int,set,C}$ tem-se $\vartheta_{air,set} = \vartheta_{int,set,C}$.

Caso $\vartheta_{air,0} < \vartheta_{int,set,H}$ tem-se $\vartheta_{air,set} = \vartheta_{int,set,H}$.

A potência de aquecimento ou arrefecimento necessária para atingir a temperatura de *set-point* pré-estabelecida é positiva para aquecimento e negativa para arrefecimento e dá-se pela seguinte equação:

$$\Phi_{HC,nd} = \Phi_{HC,nd,10} \frac{\theta_{air,set} - \theta_{air,0}}{\theta_{air,10} - \theta_{air,0}} \quad (49)$$

3.3 Simulação dinâmica - EnergyPlus

As ferramentas de simulação dinâmica térmica para o cálculo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento diferenciam-se dos métodos anteriormente apresentados, pela maior precisão e rigor dos resultados obtidos uma vez que a metodologia de cálculo apresenta também uma maior complexidade.

O *EnergyPlus*, tal como ilustrado na Figura 7, é uma ferramenta de simulação dinâmica desenvolvida pelo DOE (*Department of Energy*, EUA) que relaciona vários módulos com o seu motor de simulação permitindo determinar as necessidades energéticas de um edifício em intervalos menores de uma hora.

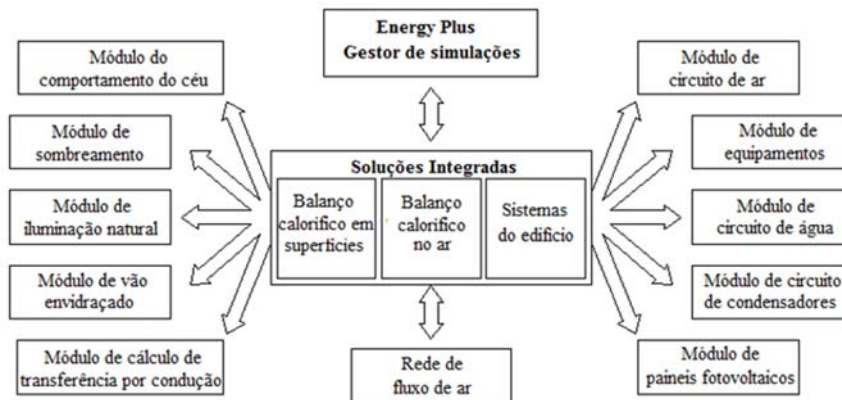


FIGURA 7 – Estrutura dos módulos do *EnergyPlus* (*Engineering Reference. Energyplus.net*, sem data).

O *EnergyPlus* determina as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento para uma zona térmica aplicando o método matemático preditor corretor na seguinte equação³:

³ *Engineering Reference – EnergyPlus 8.0. Basis for the Zone and Air System Integration.* <http://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-0/engineering-reference/page-008.html>

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + Q_{sys} \quad (50)$$

Onde,

$C_z \frac{dT_z}{dt}$ é a energia armazenada na zona térmica, em J;

$\sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_i$ é o somatório das cargas internas por convecção, em J;

$\sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ é a transferência de calor por convecção das superfícies da zona térmica, em J;

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$ é a transferência de calor devido a infiltrações do ar exterior, em J;

Q_{sys} é o fluxo de calor associado aos sistemas de aquecimento/arrefecimento, em J;

Os dados para a simulação dinâmica são inseridos pelo utilizador através de dois ficheiros (ver Figura 8): o ficheiro de dados climáticos “.EPW” com informação detalhada de parâmetros relacionados com o comportamento do meio ambiente local tal como elencado na Tabela 1 e o ficheiro de *inputs* “.IDF” no qual se encontram todos os dados relacionados com a caracterização do edifício e da simulação.

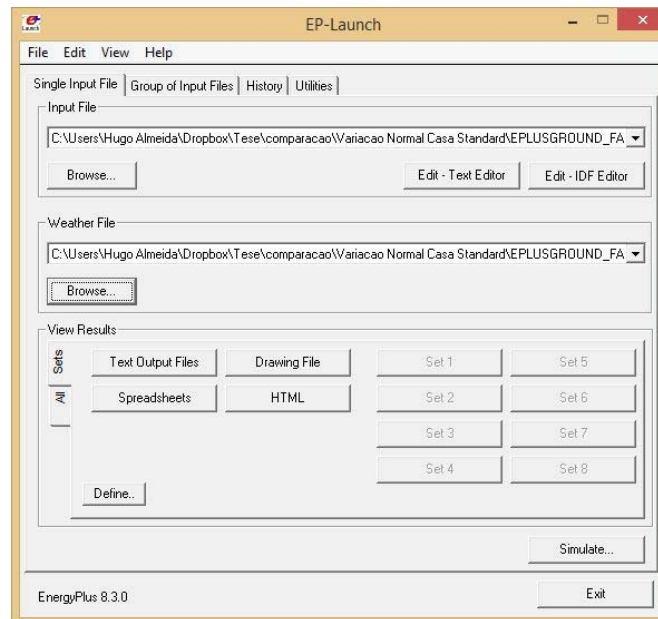


FIGURA 8 – Interface do programa *EnergyPlus* onde é possível seleccionar os ficheiros “.IDF” e “.EPW” e executar o comando “IDF Editor”.

O *EnergyPlus* pode ser associado a *softwares* que constituam interface gráficas mais amigáveis que fundamentalmente facilitam a entrada de dados na construção da geometria do edifício, como por exemplo, o *OpenStudio SketchUp Plug-in* ou o *DesignBuilder*.

3.3.1 Introdução de dados

É possível adicionar ou alterar vários dados de entrada no *EnergyPlus* através do executável “IDF Editor”. O programa agrupa por classes os campos onde são introduzidos os dados necessários para a simulação dinâmica. Para a modelação de edifícios mais simples podemos destacar os seguintes parâmetros:

Simulation Parameters

Nesta classe encontram-se alguns parâmetros importantes, nomeadamente tipo de algoritmo responsável pelo balanço de calor do ar interior e das superfícies e o tipo de distribuição solar.

Location and Climate e Schedules

Nestas classes é possível definir e relacionar as estações de aquecimento e arrefecimento com as temperaturas de *set-point*.

Surface Construction Elements e Thermal Zones and Surfaces

Estas classes são responsáveis pela caracterização da construção do edifício. São definidas as propriedades dos materiais e agrupam-se os materiais para constituir uma solução construtiva. Define-se também a zona térmica e introduz-se os dados relativos à geometria do edifício. Além disso associa-se cada solução construtiva, uma superfície que compõe a zona térmica.

Zone Airflow

Nesta classe é possível introduzir no campo *Zone Infiltration: Design Flow Rate* dados relativos à renovação de ar interior.

Zone HVAC Controls and Thermostats e Zone HVAC Forced Air Units

Nestas classes é possível definir um sistema de aquecimento e arrefecimento ideal no campo *Zone HVAC: Ideal Loads Air System* e definir quais os *Schedules* referentes às temperaturas de referência para aquecimento e arrefecimento através do campo *Thermostat Setpoint: Dual Setpoint*.

3.3.2 Resultados da simulação

Introduzidos os dados necessários à simulação e indicado o ficheiro climático, o utilizador tem a liberdade de escolher que variáveis de resultados pretende estudar. Para exemplificar, além das necessidades nominais de aquecimento e de arrefecimento ambiente é possível obter os resultados da temperatura interior da zona térmica, os ganhos solares dos envidraçados e envolvente opaca, os ganhos/perdas térmicas associadas à infiltração de ar, os ganhos/perdas térmicas referentes à condução de calor pela envolvente opaca, etc.

Após a realização da simulação, o *EnergyPlus* pode fornecer os resultados em folhas de cálculo, sendo necessário o seu tratamento na conversão de unidades caso o utilizador deseje.

	A	B	C	D	E
1		Zone Outdoor	Zone Mean Air	Zone Ideal Loads	Zone Ideal Loads
2	Date/Time	Air Drybulb	Temperature	Zone Total Heating	Zone Total
3		Temperature	[C](Hourly)	Energy [J](Hourly)	Cooling Energy
4	01/01 01:00	8.89	20.00	6055903.13	0.00
5	01/01 02:00	8.13	20.00	6788559.81	0.00
6	01/01 03:00	7.45	20.00	7492249.51	0.00
7	01/01 04:00	6.91	20.00	8133612.13	0.00
8	01/01 05:00	6.53	20.00	8709092.09	0.00
9	01/01 06:00	6.23	20.00	9239091.81	0.00
10	01/01 07:00	6.10	20.00	9729046.20	0.00
11	01/01 08:00	6.33	20.00	10004409.29	0.00
12	01/01 09:00	7.26	20.00	6702705.20	0.00
13	01/01 10:00	8.85	20.00	4802457.21	0.00
14	01/01 11:00	10.77	20.00	2977241.69	0.00

FIGURA 9 – Folha de cálculo reproduzida pelo *EnergyPlus* após efetuada a simulação.

4. METODOLOGIA

Os métodos foram aplicados a um edifício virtual, mais concretamente, a uma moradia independente, composta por uma única zona térmica com elementos construtivos de inércia térmica forte. A avaliação das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento relativos aos três métodos foi efetuada para uma solução construtiva a que se designou de “solução inicial” e para outra que representa uma solução com maior isolamento térmico – “solução melhorada”, considerando sempre três diferentes climas de Portugal (Algarve, Grande Lisboa e Alto Trás-os-Montes).

Para uma análise comparativa mais precisa é necessário garantir a equivalência dos dados de entrada (*inputs*) e das condições fronteira para os três métodos. Para o efeito, foi fundamental corrigir o método sazonal, para permitir a entrada de dados climáticos de base horária, e criar restrições ao motor de simulação do *EnergyPlus*, de forma a garantir que as condições fronteira fossem equivalentes às dos métodos simplificados.

4.1 Descrição da habitação

Uma comparação adequada dos resultados das necessidades energéticas produzidos pelos diferentes métodos requer a adoção da mesma fonte de dados climáticos e das mesmas condições fronteira. Essa equivalência entre os métodos é apresentada com maior detalhe no subcapítulo 4.2.

Foram utilizadas as seguintes simplificações na construção dos métodos:

- ▶ Não se consideraram fontes de calor internas;
- ▶ Não foram contabilizadas quaisquer obstruções solares, nem dispositivos de sombreamento;
- ▶ Desprezaram-se as pontes térmicas lineares;
- ▶ Não existem caixilharias nos vãos envidraçados;
- ▶ As perdas de calor de onda-longa não lineares com o céu foram desprezadas.

Para este estudo foi relevante estabelecer diferentes localizações do edifício e diferentes soluções construtivas, de maneira a assegurar a reprodutibilidade da análise comparativa.

Além do modelo base caracterizado nos subtítulos seguintes, procurou-se ainda analisar a sensibilidade dos métodos anteriormente apresentados perante duas simplificações adicionais:

- ▶ Inexistência de trocas de calor pelo solo;

- ▶ Inexistência de ganhos térmicos resultantes da radiação solar absorvida pelos elementos da envolvente opaca.

4.1.1 Localização e clima

Foram utilizadas três regiões em Portugal associadas a três zonamentos distintos estabelecidos com base no NUTS III e de acordo com o Despacho n.º 15793-F/2013 (ver Figura 4):

- ▶ Alto Trás-os-Montes, com um dos climas mais severos no inverno de Portugal (I3, V2);
- ▶ Grande Lisboa, com um clima moderado (I1, V2);
- ▶ Algarve, com um dos climas mais quentes (I1, V3).

Os dados climáticos das respetivas localizações utilizados nos métodos foram retirados da aplicação “Climas-SCE”, relativos ao período de um ano, fornecidos numa base horária.

4.1.2 Geometria do edifício

O edifício analisado consiste numa habitação isolada sem obstruções solares com uma cobertura horizontal e de formato quadrangular com fachadas na orientação norte, sul, este e oeste. Cada fachada possui um vão envidraçado. O seu espaço interior, tal como anteriormente referido, é considerado como apenas uma zona térmica.

Na tabela seguinte estão representadas as dimensões da habitação em estudo.

TABELA 3
Levantamento dimensional da habitação.

Características	Dimensões
Pé direito (m)	2,7
Área útil de pavimento (m ²)	100
Área de espaço não útil (m ²)	---
Área de cobertura (m ²)	100
Área total da fachada (m ²)	27 × 4
Área opaca da fachada (m ²)	23,25 × 4
Área envidraçada da fachada (m ²)	3,75 × 4
Área envidraçada/Área total da fachada (%)	13,8
Área envidraçada/Área útil de pavimento (%)	15
Volume da zona térmica (m ³)	270

4.1.3 Materiais de construção e vãos envidraçados

O caso de estudo apresenta dois tipos de soluções construtivas: solução inicial e solução melhorada. Os elementos construtivos que compõem a habitação são soluções tipicamente usadas em Portugal. A composição desses elementos foi baseada no documento ITE50. As seguintes tabelas identificam detalhadamente os materiais das duas soluções construtivas da habitação.

TABELA 4

Propriedades dos materiais de cada elemento opaco da Solução inicial (do interior para o exterior).

Elemento	Material	Espessura (cm)	Condutividade térmica (W/(m.K))	Densidade (Kg/m ³)	Calor específico (J/(Kg.K))
Paredes exteriores	Reboco	1,5	1,3	1800	1044
	Tijolo	11	0,4	1100	828
	Cx ^a Ar	1	R = 0,15 m ² K/W	---	---
	Tijolo	11	0,4	1100	828
	Reboco	1,5	1,3	1800	1044
Cobertura	Reboco	1,5	1,3	1800	1044
	Betão	20	2	2400	972
	Betão leve	10	0,46	1050	960
	XPS	4	0,037	35	1260
	Membrana	1	0,16	1121	1460
Pavimento	Ladrilho cerâmico	2	0,7	2000	936
	Betonilha	3	0,7	1600	792
	Betão leca	8	0,15	1500	1001
	Massame	10	0,7	2200	936
	Enrocamento	15	0,7	1800	1001

TABELA 5

Propriedades dos materiais de cada elemento opaco da Solução melhorada (do interior para o exterior).

Elemento	Material	Espessura (cm)	Condutividade térmica (W/(m.K))	Densidade (Kg/m ³)	Calor específico (J/(Kg.K))
Paredes exteriores	Reboco	1,5	1,3	1800	1044
	Tijolo	11	0,4	1100	828
	EPS	3	0,04	15	1512
	Cx ^a Ar	1	R = 0,15 m ² K/W	---	---
	Tijolo	11	0,4	1100	828
	Reboco	1,5	1,3	1800	1044
Cobertura	Reboco	1,5	1,3	1800	1044
	Betão	20	2	2400	972
	Betão leve	10	0,46	1050	960
	XPS	8	0,037	35	1260
	Membrana	1	0,16	1121	1460

Pavimento	Ladrilho cerâmico	2	0,7	2000	936
	Betonilha	3	0,7	1600	792
	Betão leca	8	0,15	1500	1001
	Massame	10	0,7	2200	936
	Enrocamento	15	0,7	1800	1001

Utilizaram-se as resistências superficiais térmicas internas (R_{si}) e externas (R_{se}) conforme a norma ISO 13790. Essas resistências são calculadas com base num coeficiente de transferência de calor que inclui fenómenos de convecção mas também de radiação, uma vez que para a generalidade dos edifícios as superfícies internas das paredes estão sensivelmente à mesma temperatura que o ar interior. As resistências variam de acordo com o sentido do fluxo de calor apresentadas na seguinte tabela:

TABELA 6
Resistências superficiais térmicas com $h_r = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Superfície	Sentido do fluxo de calor	$h_{total} \text{ (W/ m}^2\text{K)}$	$R \text{ (m}^2\text{K/W)}$
Externa	Qualquer sentido	25	0,04
Interna	Horizontal (paredes)	7,5	0,13
	Vertical (ascendente)	10	0,10
	Vertical (descendente)	5,7	0,17

Na tabela seguinte apresentam-se os coeficientes de transmissão térmica para cada elemento (incluindo vãos envidraçados) de cada solução:

TABELA 7
Coeficientes de transmissão térmica de cada solução construtiva ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$).

U	Solução inicial	Solução melhorada
Pavimento	0,85	0,85
Cobertura	0,62	0,37
Paredes	1,16	0,62
Vãos envidraçados	4 (vidro simples)	2,5 (vidro duplo)

A capacitância térmica, C_m , determina quantitativamente a inércia térmica da habitação, de acordo com a equação (27) e com o auxílio da Tabela 4 e TABELA 5 determinou-se o valor aproximado de C_m de 475 kJ/K, independentemente da solução construtiva escolhida, concluindo-se, de acordo com a norma ISO 13790, que a classe de inércia térmica é muito forte.

Uma vez que o pavimento da habitação se encontra em contacto direto com o solo, implica que seja calculado um coeficiente de transmissão térmica para pavimentos térreos porque o solo atenua as perdas de calor por transmissão, através da sua inércia térmica praticamente infinita. A metodologia de cálculo deste coeficiente de transferência térmico equivalente depende do método utilizado para

cálculo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, uma vez que este se diferencia dos métodos simplificados para a simulação dinâmica.

Considerou-se que o fator solar dos vãos envidraçados é de 0,765 para ambas as soluções construtivas.

A absorvidade solar das superfícies exteriores da envolvente da habitação é de 0,7 (cor média).

4.1.4 Sistemas da habitação

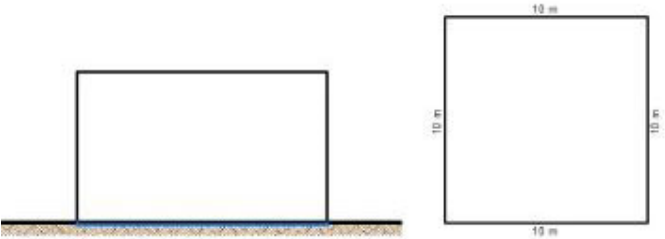
Adotou-se um sistema ideal AVAC para aquecimento e arrefecimento ambiente sempre que seja necessário durante a estação de aquecimento e arrefecimento, respetivamente, com as seguintes temperaturas de *set-point*:

- ▶ Para a estação de aquecimento — 20 °C;
- ▶ Para a estação de arrefecimento — 26 °C.

A renovação de ar é feita, exclusivamente por via de infiltração à taxa nominal de 0,653 renovações por hora (176 m³/h).

4.1.5 Síntese das características da habitação

TABELA 8
Síntese geral do caso de estudo.

Características		
Localização	Alto Trás-os-Montes Grande Lisboa Algarve	
Geometria (Tabela 3)		
Soluções construtivas (Tabela 7)	<u>Solução Inicial</u> Parede dupla s/ isolamento Pavimento s/ isolamento Cobertura c/ isolamento 4 cm Vidro simples	<u>Solução Melhorada</u> Parede dupla c/ isolamento Pavimento s/ isolamento Cobertura c/ isolamento 8 cm Vidro duplo
Inércia térmica	Muito forte	
Fator solar envidraçados	0,765	
Infiltração de ar	176 m ³ /h (0,653 rph)	
HVAC	Sistema ideal	
Temperaturas de <i>set-point</i>	Inverno (Aquecimento) 20 °C Verão (Arrefecimento) 26 °C	
Alterações no modelo	Pavimento adiabático Remoção dos ganhos solares da envolvente opaca	

Área efetiva de captação solar na estação de aquecimento, m²

Visto que se utilizaram os dados climáticos horários é possível incluir os ganhos solares associados à envolvente opaca da habitação para a estação de aquecimento, parâmetro esse desprezado no REH. Como tal a área efetiva coletora de cada superfície i apresentada na equação (18) é substituída pela seguinte expressão:

$$Ab_{sol,i} = A_w F_g g_{sol} + \alpha R_{se} U_{op} A_{op} \quad (51)$$

Por consequência, a equação representativa dos ganhos solares é a mesma apresentada no cálculo das necessidades de energia para arrefecimento [equação (23)].

Coefficiente de transmissão térmica para pavimentos em contacto com o solo, $U_{pav,eq}$ em W/(m²K)

No Despacho 15793-K/2013 é apresentada uma metodologia de cálculo para este coeficiente em função da dimensão característica do pavimento B' , da resistência térmica de todas as camadas do pavimento, R_f (com exclusão de resistências térmicas superficiais) e da largura ou profundidade do isolamento. Uma vez que o pavimento da habitação em estudo não possui isolamento conclui-se que $U_{pav,eq}$ assume o valor estimado de 0,475 W/(m²K). Devido à simplicidade do método este valor em termos de cálculo interage com a temperatura exterior uma vez que faz parte da condutância global de transferência de calor por transmissão H_{tr} dada pela equação (4).

Modelo com pavimento adiabático e modelo sem ganhos solares através dos elementos opacos

Para criação dos modelos acima referidos são necessárias as seguintes alterações:

- ▶ Modelo com pavimento adiabático: Não incluir H_{ecs} na equação (4).
- ▶ Modelo sem ganhos solares através da envolvente opaca: Desprezar a segunda parcela (referente aos ganhos solares pela envolvente opaca) da equação (51).

4.2.2 Método horário adaptado ao caso de estudo

O método horário não necessitou de qualquer alteração à metodologia descrita no subcapítulo 3.2. O método foi também construído numa folha de Excel tal como ilustrado na Figura 11.

A metodologia utilizada para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica para pavimentos em contacto com o solo foi a mesma adotada para o método sazonal, pelo que, $U_{pav,eq}$ toma também o valor de 0,475 W/(m²K).

As alterações necessárias para criar um modelo com pavimento adiabático e outro sem ganhos solares através da envolvente opaca seguem as mesmas indicações referidas para método sazonal no subcapítulo 4.2.1.

Simplified dynamic hourly method					Grande Lisboa (altitude de referência)									
Inputs														
Hwindow	60.1	W/K	floor area	100	m2	N	E	S	W	H				
H opaqu	217	W/K				solar aperture	3.63	3.63	3.626	3.6264	1.74	m2		
inertia	5	(1: very light to 5 very heavy)	natural light aperture				0	0	0	0	0	m2		
			solar aperture with shading				3.63	3.63	3.626	3.6264	1.74	m2		
occup.	unocc.													
ventilation	176	176	m3/h			area naturally lighted	100	m2						
internal gains	0	0	W			electrical lighting power	0	W						
set point heating	20	20	°C			lighting control	1	1 manual switch (to be developed)						
set point cooling	26	26	°C											
per floor area, for information														
Hwindow	0.6	W/(K. m2 of floor area)				N	E	S	W	H				
H opaqu	2.17	W/(K. m2 of floor area)				solar ratio	0.04	0.04	0.036	0.0363	0.017	ad		
						natural light ratio	0	0	0	0	0	ad		
occup.	unocc.					solar aperture with shading	0.04	0.04	0.036	0.0363	0.017	ad		
ventilation	1.76	1.76	m3/(h.m2)			ratio of area naturally lighted	1							
internal gains	0	0	W/m2			electrical lighting power	0	W/m2						
Monthly and yearly results														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	year	
heating	1263	826	430	122	0	0	0	0	0	0	397	1152	4191	kWh
cooling	0	0	0	0	0	-358	-854	-766	-421	0	0	0	-2399	kWh
internal gains	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
lighting	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh

FIGURA 11 – Aplicação do método horário ao caso de estudo construído numa folha de cálculo Excel.

4.2.3 EnergyPlus adaptado ao caso de estudo

O *EnergyPlus* não utiliza as restrições recomendadas pela ISO 13790 porque os algoritmos, por defeito, providenciam uma representação mais realista do comportamento térmico dos edifícios. Porém, tendo em conta o objetivo deste trabalho, foi necessário fazer algumas alterações, de forma a uniformizar, como anteriormente referido, os *inputs* e as condições fronteira para todos os métodos.

Ainda que no âmbito deste trabalho não tenham sido exploradas todas as funcionalidades deste método, grande parte das alterações referidas estão em conformidade com aquilo que a norma ISO 13790 sugere:

«A dynamic method models thermal transmission, heat flow by ventilation, thermal storage and internal and solar heat gains in the building zone. There are numerous methods to do so, ranging in complexity from simple to very detailed. There are other standards (e.g. EN 15265) describing detailed simulation methods or performance criteria for such meth-

ods. This International Standard provides the environment of standardized boundary conditions and standardized input and output data that enables compatibility and consistency between the different methods »[EN ISO 13790, 2008: p.18-19]

Sabe-se que dos três métodos em estudo, o *EnergyPlus* é o que melhor simula as condições reais, devido ao maior nível de complexidade e detalhe nos cálculos, pelo que, foi o mesmo utilizado como método de referência neste estudo.

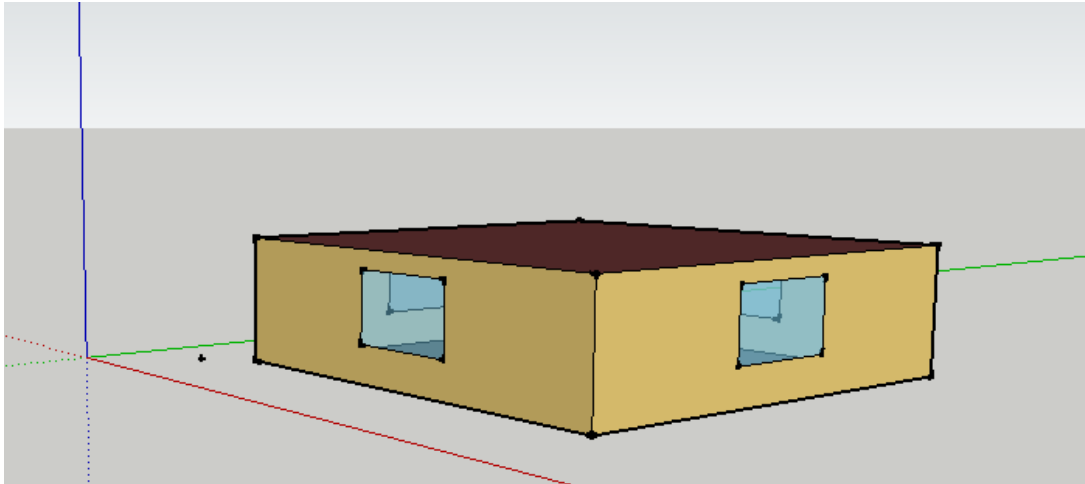


FIGURA 12 – Visualização gráfica da habitação do caso de estudo no programa *OpenStudio SketchUp Plug-In*.

Algoritmo de transferência de calor para a envolvente

O algoritmo de transferência de calor considerado para a envolvente do edifício foi o *Conduction Transfer Function*, que considera apenas o calor sensível. Este algoritmo propõe apenas para efeitos de simulação a ocorrência de fenómenos de transmissão de calor por condução, desprezando o armazenamento de humidade nos elementos construtivos tal como acontece nos métodos simplificados.

Coefficiente de transferência de calor por convecção e radiação

De forma a incluir as resistências térmicas superficiais R_{si} e R_{se} presentes também nos métodos simplificados foi necessário utilizar valores constantes para os coeficientes de transferência de calor por convecção e radiação. Para que esta condição se verifique foi fundamental definir uma emissividade de zero nas superfícies interiores e exteriores da habitação e estabelecer valores fixos para os coeficientes de transferência de calor por convecção indicados na Tabela 6. Desta forma todos os métodos incluem as chamadas perdas de calor de onda-longa lineares inseridas nas resistências R_{si} e R_{se} , desprezando assim a parte considerada não linear.

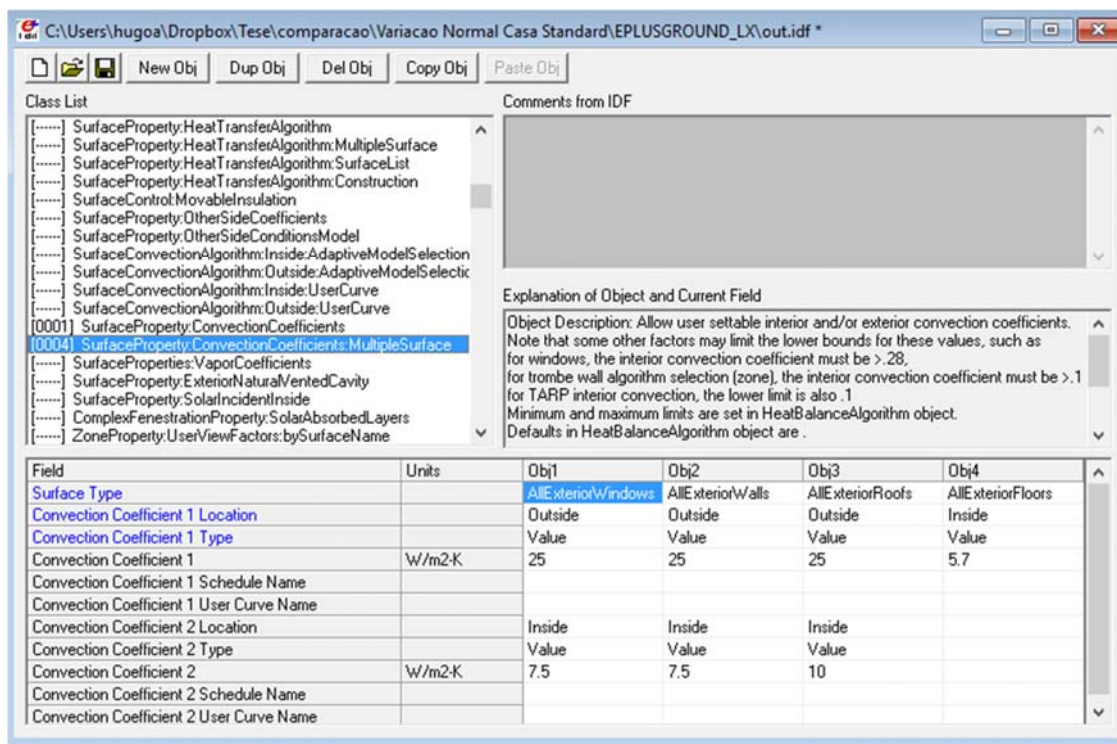


FIGURA 13 – Definição de valores constantes para os coeficientes de transferência térmica por convecção em conformidade com a Tabela 6.

Distribuição solar

A distribuição solar definida por defeito no *EnergyPlus* assume que toda a radiação solar direta que entra na zona através dos vãos envidraçados incide no pavimento (*Solar Distribution: FullExterior*), onde é absorvida de acordo com a absortividade solar. Tendo em conta a equivalência entre os métodos definiu-se que a superfície interna do pavimento tem uma absortividade solar de 1, para que, pelo menos a radiação que atravessa os vãos envidraçados não seja refletida parcialmente por efeitos óticos para fora da zona térmica.

Transferência de calor por transmissão para o solo

O *EnergyPlus* modela a transferência de calor por transmissão para o solo tendo em conta a temperatura do solo. Considerando este fator, logicamente que a metodologia de cálculo da transmissão de calor pelo solo é diferente da utilizada nos métodos simplificados.

Por defeito essa temperatura assume um valor de 18 °C. Para a modelação da construção do pavimento em contacto com o solo e suas condições fronteira exterior à habitação utilizou-se uma metodologia semelhante à encontrada no anexo D da norma ISO 13370 para simulações dinâmicas, descrita

no documento “*DOE-2.1E Corrections and Bug Fixes - Underground Surfaces: How to Get a Better Underground Surface Heat Transfer Calculation in DOE-2.1E by Fred Winkelmann, p. 10*”. Este procedimento inclui uma espessura específica do solo e uma camada virtual (com propriedades termofísicas específicas) por baixo do pavimento. O $U_{pav,ef}$ segundo o relatório de *outputs* do *EnergyPlus* assume o valor de 0,361 W/(m²K).

A metodologia acima referida utiliza as temperaturas mensais do solo definidas no campo *Site:GroundTemperature:BuildingSurface* que por defeito assumem o valor de 18 °C para todos os meses, a menos que o ficheiro de dados climáticos contenha informação sobre as temperaturas mensais do solo (o que não é o caso) ou que o sejam definidos manualmente essas temperaturas. Em face a essa realidade, retiraram-se as temperaturas do solo de outros ficheiros de dados climáticos providenciados pelo *website* do *EnergyPlus* para as mesmas regiões e adaptaram-se para o nosso caso de estudo antes de serem introduzidas no *EnergyPlus*.

Weather Data by Region

All Regions - Europe WMO Region 6 - Portugal

Select a location.

Braganca 085750 (IWECE)
Coimbra 085490 (IWECE)
Evora 085570 (IWECE)
Faro 085540 (IWECE)
Funchal Madeira-Islands 085210 (INETI)
Lajes 085090 (IWECE)
Lisboa 085360 (INETI)
Porto 085450 (IWECE)

FIGURA 14 – Ficheiros climáticos com temperaturas mensais do solo disponíveis em *energyplus.net* - Utilização dos ficheiros climáticos marcados a amarelo.

Esta adaptação foi efetuada através do seguinte procedimento:

- ▶ Calcularam-se as temperaturas médias mensais do ar exterior dos ficheiros providenciados pelo LNEG e pelo *website energyplus.net*;
- ▶ Determinaram-se as diferenças entre essas temperaturas mensais $T_{e,LNEG} - T_{e,website}$;
- ▶ Utilizaram-se essas diferenças para corrigir as temperaturas do solo retiradas dos ficheiros disponibilizados no *website energyplus.net*.

mês	Temperatura média mensal do ar exterior T_e						$\Delta T_e = T_{e,Lneg} - T_{e,website}$			$T_{solo,website}$			$T_{solo,Lneg} = T_{solo,website} + \Delta T_e$		
	LNEG			Website EnergyPlus						Website EnergyPlus			LNEG		
	Bragança	Lisboa	Faro	Bragança	Lisboa	Faro	Bragança	Lisboa	Faro	Bragança	Lisboa	Faro	Bragança	Lisboa	Faro
1	5.5	10.8	11.3	4.3	10.6	11.8	1.2	0.2	-0.5	9.9	14.6	17.4	11.2	14.8	16.9
2	7.1	11.8	12.1	6.0	11.5	12.4	1.1	0.3	-0.3	8.7	13.8	16.1	9.7	14.1	15.7
3	9.6	13.5	13.8	9.3	12.8	14.8	0.3	0.7	-1.0	8.4	13.6	15.2	8.7	14.2	14.2
4	11.4	14.7	15.1	10.8	14.6	15.8	0.6	0.0	-0.6	8.8	13.8	15.0	9.4	13.8	14.3
5	15.0	16.8	17.6	12.9	17.3	18.6	2.1	-0.5	-1.0	10.7	15.2	15.5	12.8	14.6	14.5
6	19.8	20.1	21.3	17.6	20.1	21.1	2.2	0.0	0.2	12.8	16.6	16.6	15.0	16.6	16.8
7	23.2	22.4	24.3	21.7	22.3	23.9	1.5	0.1	0.4	14.7	17.9	18.0	16.2	18.0	18.4
8	23.1	22.6	24.4	21.0	22.6	23.7	2.1	0.1	0.7	16.0	18.8	19.4	18.1	18.9	20.0
9	19.9	21.5	22.5	17.5	21.3	21.8	2.5	0.2	0.7	16.3	19.0	20.3	18.8	19.3	21.0
10	14.5	18.0	18.6	13.2	17.8	20.2	1.3	0.2	-1.6	15.6	18.5	20.5	16.8	18.7	18.9
11	9.5	14.3	15.0	8.4	13.6	15.5	1.0	0.7	-0.6	13.9	17.4	20.0	15.0	18.1	19.4
12	6.7	12.0	12.5	5.6	11.0	13.2	1.1	1.0	-0.7	11.9	16.0	18.9	13.0	17.0	18.2

FIGURA 15 – Determinação das temperaturas médias mensais do solo (a verde) a partir de outros ficheiros de dados climáticos.

Reconhece-se, no entanto, que esta aproximação apresenta algum erro, uma vez que a taxa de variação da temperatura ambiente não se repercute da mesma forma no interior do solo.

Modelo sem ganhos solares opacos

Para a construção de um modelo que despreze os ganhos solares através da envolvente opaca, definiu-se uma absortividade nula para as superfícies exteriores da envolvente opaca.

Modelo com pavimento adiabático

Para a construção deste modelo altera-se o campo *Outside Boundary Condition Object* da superfície (exterior) do pavimento para superfície adiabática. Desta forma toda a transferência de calor para a superfície interna é armazenada e libertada novamente para a zona térmica em vez de se transferir para o solo. Por conseguinte está-se em concordância com os métodos simplificados que preservam a mesma inércia térmica apesar da ausência de transferência de calor do pavimento para o solo.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Uma vez calculadas as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento aplicadas ao caso de estudo, procedeu-se à análise dos resultados obtidos.

Como anteriormente referido, as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento da habitação aqui em estudo são a energia útil necessária para manter a temperatura interior da habitação, a uma temperatura mínima de 20 °C, na estação de aquecimento, e a uma temperatura máxima de 26 °C, na estação de arrefecimento.

Nas figuras que se seguem apresentam-se as necessidades de energia para aquecimento (Figura 16) e arrefecimento (Figura 17) do modelo base, para as soluções construtivas “inicial” e “melhorada”, considerando os resultados obtidos através do método sazonal, do método horário e da simulação dinâmica através do *EnergyPlus*.

No Anexo A encontram-se tabelados todos os resultados obtidos das necessidades de aquecimento e arrefecimento para os três métodos apresentados neste capítulo.

5.1 Modelo base

A comparação dos resultados obtidos por cada um dos métodos exigiu que fossem utilizados os mesmos dados climáticos e as mesmas condições fronteira. A título de exemplo, relembre-se que o método sazonal, segundo o REH, não contabiliza os ganhos solares através da envolvente opaca para o cálculo das necessidades de energia para aquecimento. Caso este parâmetro não tivesse sido incluído nesta avaliação, os resultados do método sazonal estariam sobrestimados, com valores, por exemplo, para a região do Algarve, para a solução construtiva inicial de 46,37 kWh/m², em vez de 33,15 kWh/m², sendo, neste caso, os valores sobrestimados em cerca de 40%.

Neccsidades anuais de energia para aquecimento, em kWh/m²

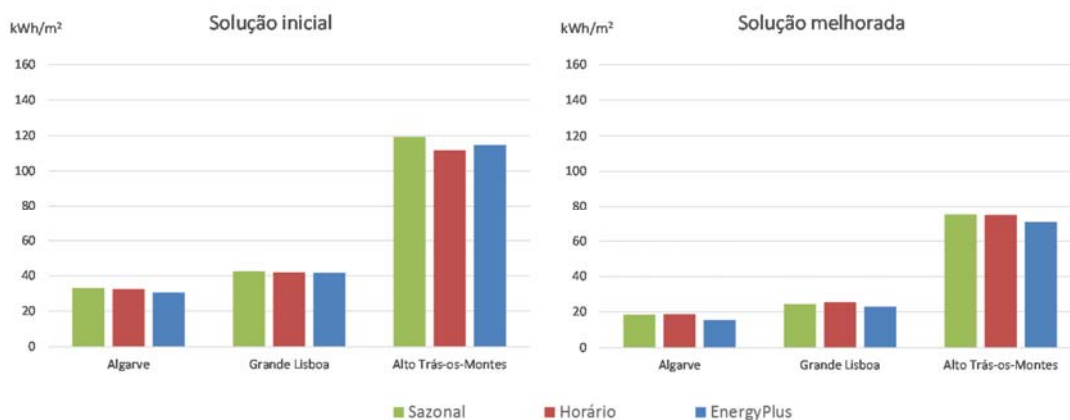


FIGURA 16 – Neccsidades anuais de aquecimento para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada – Modelo base.

Da análise da Figura 16 verifica-se que existe uma clara diferença das neccsidades de aquecimento para os diferentes métodos, consoante a solução construtiva utilizada, porém, esta é expectável devido ao maior isolamento presente em alguns elementos construtivos da solução melhorada. Tendo em conta esta redução das neccsidades, é interessante comparar a sensibilidade dos métodos face a esta alteração de solução. A tabela seguinte (Tabela 9) apresenta os resultados da variação percentual para as neccsidades de aquecimento.

TABELA 9

Sensibilidade dos métodos nas neccsidades de aquecimento relativamente à alteração de solução construtiva.

Método	Variação percentual das neccsidades de aquecimento para solução construtiva melhorada relativamente à solução construtiva inicial		
	Algarve	Grande Lisboa	Alto Trás-os-Montes
Horário	-42%	-39%	-33%
EnergyPlus	-50%	-45%	-38%
Sazonal	-44%	-43%	-37%

Os resultados apresentados na Tabela 9 mostram que o método mais sensível à troca de solução construtiva é o *EnergyPlus*, sobretudo nos climas mais amenos. No entanto, não se verifica uma discrepância significativa entre os resultados das neccsidades de aquecimento para os diferentes métodos, pelo que, se conclui que têm uma sensibilidade aproximadamente semelhante.

Necessidades anuais de energia para arrefecimento, em kWh/m²

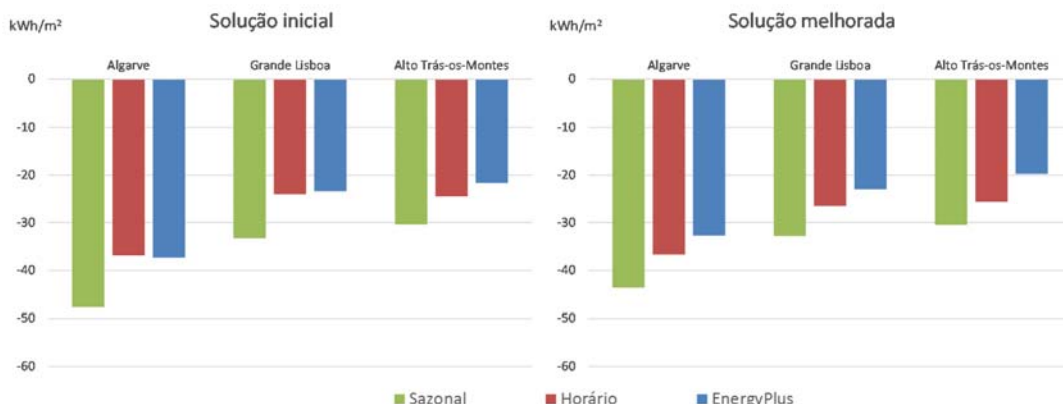


FIGURA 17 – Necessidades anuais de arrefecimento para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada – Modelo base.

Relativamente às necessidades de energia para arrefecimento, verifica-se que o método horário e o *EnergyPlus* apresentam resultados aproximadamente semelhantes. No entanto, o método sazonal apresenta diferenças significativas em relação aos outros métodos, que podem ser explicadas pela utilização da temperatura média exterior da estação de arrefecimento para cálculo da transferência de calor por transmissão e ventilação. Uma pequena variação neste valor de temperatura implica grandes diferenças no total de transferência de calor linear.

É também de referir que, neste caso, as diferenças entre as soluções não têm a mesma expressão, comparativamente ao observado nos resultados obtidos relativos às necessidades de aquecimento, na medida em que o aumento do isolamento verificado na solução construtiva melhorada não se reflete diretamente numa alteração significativa dos resultados das necessidades de arrefecimento, a não ser que, esta solução admitisse dispositivos de sombreamento, o que não é o caso.

5.2 Modelo sem ganhos solares opacos

Nos climas mediterrânicos, devido à quantidade de radiação recebida pelos elementos pesados, a influência da massa térmica é significativamente maior para o conforto térmico dos habitantes, pois, esta, atua como acumulador de energia térmica. Devido a este facto, decidiu-se estudar o comportamento das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, sem ganhos solares através da envolvente opaca, e, comparar os resultados com os do modelo base, de forma a obter-se a sensibilidade de cada método. Nas figuras que se seguem (Figura 18 e Figura 19) são apresentadas as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

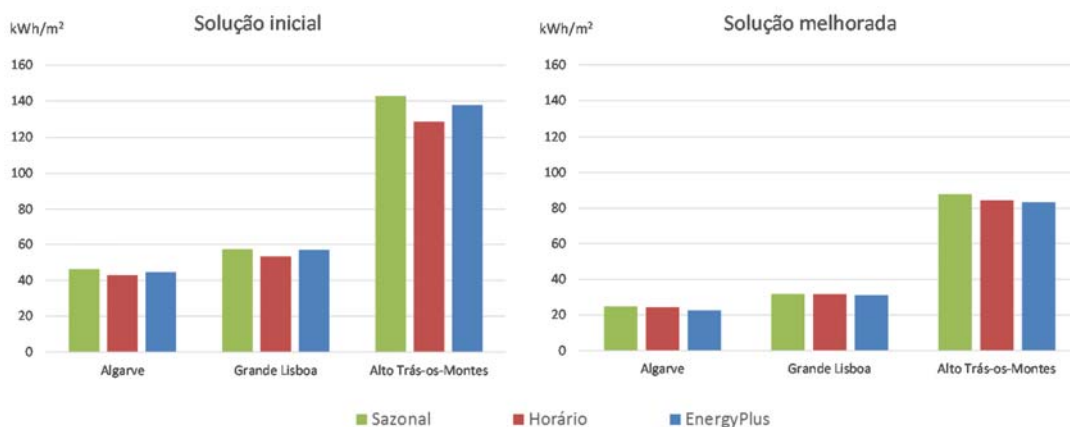


FIGURA 18 – Necessidades anuais de aquecimento para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada – Modelo sem ganhos solares opacos.

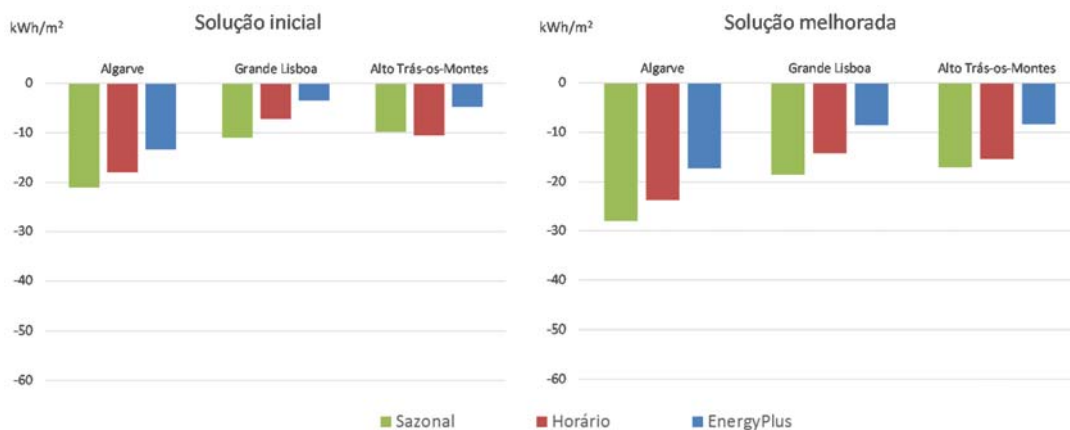


FIGURA 19 – Necessidades anuais de arrefecimento para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada – Modelo sem ganhos solares opacos.

Naturalmente que sem os ganhos térmicos resultantes da absorção solar por parte dos elementos pesados, as necessidades de aquecimento aumentam e as de arrefecimento diminuem. Verifica-se nas necessidades de aquecimento deste modelo boa concordância de resultados entre os métodos. Para as necessidades de arrefecimento, nota-se, em relação ao modelo base, uma maior discordância entre os métodos, sobretudo para os resultados do *EnergyPlus* que apresentam uma maior redução.

Os valores da variação percentual entre os dois modelos (com e sem ganhos solares) são apresentados na TABELA 10.

TABELA 10

Sensibilidade dos métodos face à não inclusão de ganhos solares através dos elementos construtivos opacos.

Variação do modelo sem ganhos solares opacos relativamente ao modelo base	Método	Solução construtiva inicial			Solução construtiva melhorada		
		Algarve	Grande Lisboa	Alto Trás-os-Montes	Algarve	Grande Lisboa	Alto Trás-os-Montes
Necessidades de energia para aquecimento	Horário	32%	27%	15%	31%	24%	13%
	EnergyPlus	46%	37%	20%	48%	36%	18%
	Sazonal	40%	35%	20%	34%	30%	17%
Necessidades de energia para arrefecimento	Horário	-51%	-70%	-57%	-35%	-46%	-40%
	EnergyPlus	-64%	-85%	-78%	-47%	-63%	-58%
	Sazonal	-56%	-67%	-68%	-36%	-43%	-44%

Constata-se, tanto nas necessidades de aquecimento como nas de arrefecimento (mais evidente), uma maior sensibilidade do *EnergyPlus* em relação aos outros métodos.

5.3 Modelo com pavimento adiabático

Tal como referido anteriormente, existe uma grande diferença entre os métodos simplificados e o *EnergyPlus*, na forma como a transferência de calor para o solo é modelada. No método sazonal e horário, o coeficiente de transmissão térmica do pavimento para o solo é corrigido, tendo em conta a diferença entre a temperatura do ar interior e exterior. No *EnergyPlus* essa correção é feita tendo em conta a diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura do solo, sendo esta variável consoante o mês. No sentido de eliminar esta diferença, estudou-se o comportamento dos métodos sem as aproximações acima referidas, ou seja, como se o pavimento se comportasse como uma superfície adiabática. Os resultados são apresentados na Figura 20 e Figura 21.

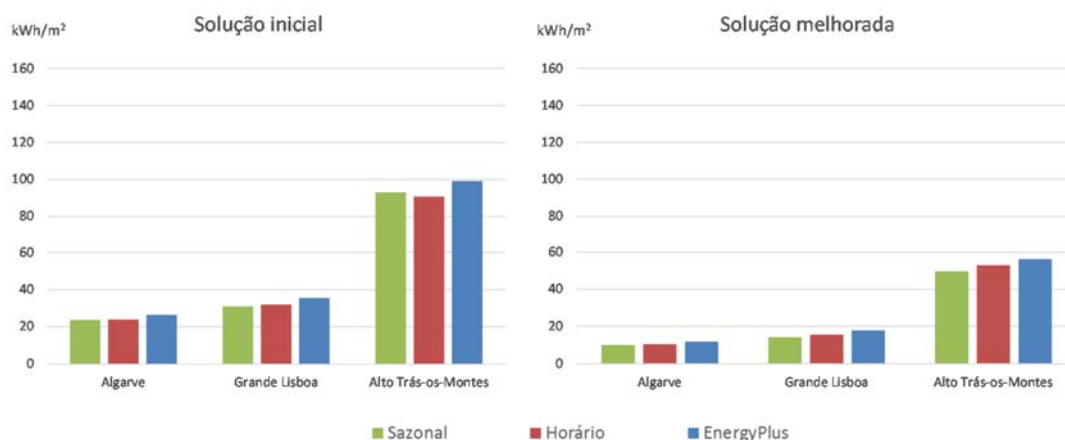


FIGURA 20 – Necessidades anuais de aquecimento para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada – Modelo com pavimento adiabático.

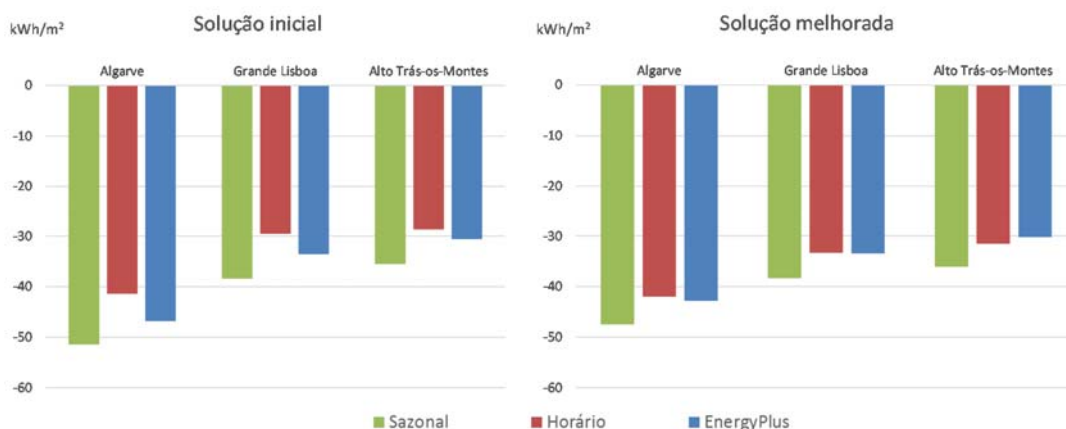


FIGURA 21 – Necessidades anuais de arrefecimento para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada – Modelo com pavimento adiabático.

Constata-se que, para os três métodos, de uma forma geral, no modelo de pavimento adiabático, as necessidades para aquecimento diminuem e as necessidades para arrefecimento aumentam, em relação ao modelo base. Através da análise da TABELA 11 observa-se que o *EnergyPlus* é, dos três métodos, o que menos varia nas necessidades de aquecimento e o que mais varia nas necessidades de arrefecimento. Tal situação deve-se à capacidade da superfície do pavimento interior armazenar e libertar calor, ainda que este elemento na sua superfície exterior seja considerado adiabático.

TABELA 11

Sensibilidade dos métodos à alteração para um pavimento adiabático relativamente ao modelo base

Variação do modelo com pavimento adiabático relativamente ao modelo base	Método	Solução construtiva inicial			Solução construtiva melhorada		
		Algarve	Grande Lisboa	Alto Trás-os-Montes	Algarve	Grande Lisboa	Alto Trás-os-Montes
Necessidades de energia para aquecimento	Horário	-27%	-24%	-19%	-43%	-39%	-29%
	EnergyPlus	-14%	-15%	-14%	-22%	-23%	-20%
	Sazonal	-29%	-27%	-22%	-45%	-42%	-34%
Necessidades de energia para arrefecimento	Horário	12%	23%	17%	14%	26%	23%
	EnergyPlus	25%	44%	41%	31%	46%	53%
	Sazonal	8%	15%	17%	9%	17%	18%

5.4 Discussão dos resultados das necessidades de energia

De um modo geral, as necessidades de energia para aquecimento calculadas pelos três métodos são semelhantes entre si, para os três modelos testados, independentemente das soluções construtivas e dos climas estudados.

Para as necessidades de arrefecimento, embora não se observem grandes diferenças entre os métodos, verifica-se uma sobrestimação dos resultados obtidos pelo método sazonal, comparativamente aos restantes, devido à utilização da temperatura média do ar exterior durante a estação de arrefecimento para o cálculo das componentes da transferência de calor linear. Destacam-se, ainda, diferenças

percentuais mais acentuadas entre os métodos em comparação com as necessidades de aquecimento, sobretudo, para o modelo sem ganhos solares opacos devido à menor magnitude dos valores.

Ainda que os métodos tenham sido adaptados para aplicação dos mesmos dados climáticos e das mesmas condições fronteira, para além das diferenças metodológicas, cada método considera diferentes pressupostos e simplificações:

- ▶ O método sazonal utiliza, para o cálculo das necessidades, o fator de utilização, que é um parâmetro empírico, função da massa térmica da habitação e da razão entre ganhos e perdas térmicas. No entanto, este fator é derivado de modelos de simulação dinâmica, ou seja, neste método são contabilizados efeitos dinâmicos através deste parâmetro;
- ▶ O método horário, apesar de não contabilizar nenhum efeito dinâmico, requer uma série de pressupostos, tais como os coeficientes de transferência de calor (h_{is} e h_{ms}), com valores indicados na norma ISO 13790 de 3,45 W/(m².K) e 9,1 W/(m².K), e a razão entre a área das superfícies interiores e a área de pavimento (Λ_{at}), sendo que esta assume o valor de 4,5, utilizado para o cálculo do coeficiente de transferência de calor entre as temperaturas interior e de estufa ($H_{tr, is}$). Para além disto, o método horário combina a massa térmica de toda a habitação numa única capacitância;
- ▶ O *EnergyPlus* apresenta um grau de complexidade superior ao método sazonal e horário. Como tal, é difícil assegurar a sua equivalência com os métodos simplificados, dado o recurso a um maior número de variáveis. Ao invés do método horário, o *EnergyPlus* distribui a massa térmica de acordo com a espessura, densidade e capacidade térmica de cada camada dos elementos pesados da habitação.

Não obstante as diferenças entre os métodos acima enumerados, os resultados que estes produzem para as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento são relativamente concordantes.

Considerando o *EnergyPlus* como método de referência é possível determinar qual o erro associado aos resultados dos métodos simplificados relativamente aos do referido método. No anexo B encontram-se as diferenças entre os resultados dos métodos simplificados e os resultados do *EnergyPlus*. De uma forma geral, para as necessidades de energia para aquecimento, o método horário apresenta um erro entre -9 a 4 kWh/m² enquanto o método sazonal apresenta um erro entre -7 a 5 kWh/m², considerando todos os modelos, soluções construtivas e climas estudados. Já para as necessidades de energia para arrefecimento o método horário apresenta um erro entre -5 a 7 kWh/m² enquanto o método sazonal apresenta um erro entre 5 a 11 kWh/m², considerando todos os modelos, soluções construtivas e climas estudados.

O método horário e o *EnergyPlus* conseguem também modelar a temperatura do ar da zona térmica. Esta variável foi também objeto de análise, no sentido de se aferir se a semelhança de resultados encontrada nas necessidades anuais de energia se mantém para a temperatura interior.

5.5 Perfis da temperatura do ar interior

Dado que o método horário e o *EnergyPlus* também conseguem modelar a temperatura do ar da zona térmica, esta variável foi objeto de análise, no sentido de se aferir se a semelhança de resultados encontrada, relativa às necessidades anuais de energia, se mantém para a temperatura do ar interior. Para o efeito, foram analisadas as temperaturas do ar interior, apenas para a região do Algarve, numa habitação de solução construtiva inicial, fora dos períodos de aquecimento e arrefecimento (regime flutuante).

O gráfico que se segue (Figura 22), embora represente apenas a segunda semana de outubro, é representativo do comportamento das temperaturas interiores durante todo o ano para o período sem climatização. No anexo C estão representados os meses em condição *free-float* de abril, maio e outubro.

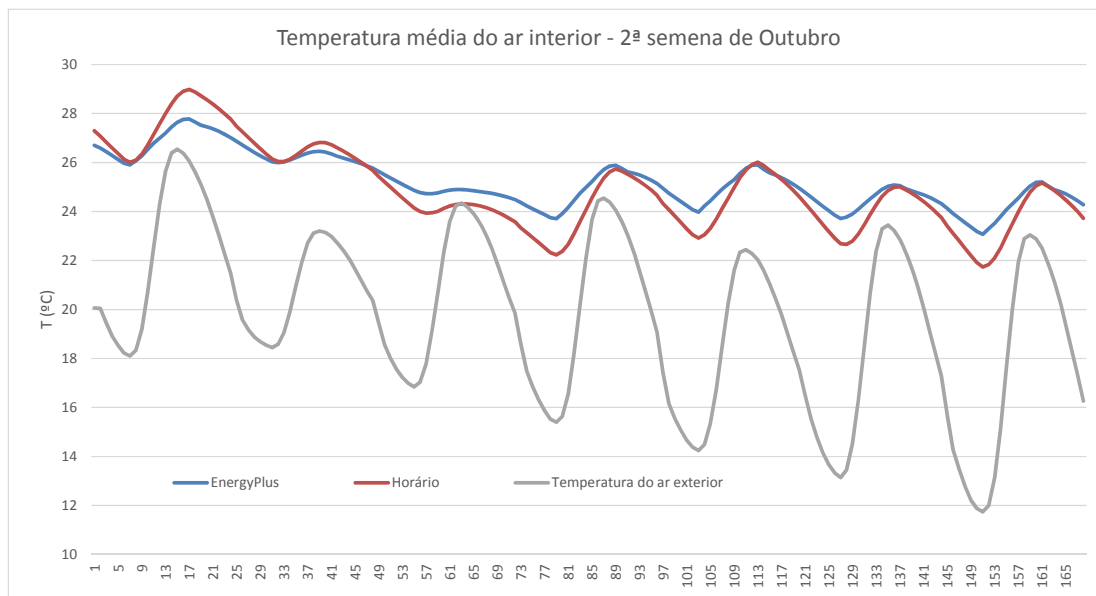


FIGURA 22 – Perfil da temperatura do ar interior na segunda semana de outubro para o método horário e *EnergyPlus*

Observa-se pela análise da Figura 22, que os valores mínimos e máximos da temperatura de ambos os métodos ocorrem no mesmo instante de tempo. Portanto, tanto o método horário como o *EnergyPlus* possuem o mesmo desfasamento para a temperatura do ar interior em relação à temperatura

exterior (note-se que os máximos/mínimos da temperatura do ar interior ocorrem ligeiramente depois dos máximos/mínimos da temperatura do ar exterior). Constatase, porém, uma diferença expressiva na atenuação da temperatura no método horário comparativamente ao *EnergyPlus*, depreendendo-se, assim, que o método horário não reproduz corretamente o efeito da inércia térmica. Este método, tal como anteriormente referido, combina todos os elementos construtivos num único elemento que constitui uma única capacitância térmica. Ao contrário do método horário, o *EnergyPlus* apresenta uma solução mais próxima da realidade, na medida em que a massa térmica é distribuída pelas camadas de cada elemento construtivo.

Da análise da Figura 22 é possível constatar que os máximos/mínimos de ambos os métodos podem atingir mais de meio grau de diferença. De forma a quantificar esta diferença de comportamento térmico, decidiu-se calcular o erro médio nos máximos e mínimos diários, nos períodos do ano fora das estações de aquecimento e arrefecimento, através das seguintes equações:

$$\frac{\sum_{i=1}^{n^{\circ} dias} |\max diário_{E+} - \max diário_H|}{n^{\circ} dias} \quad (52)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{n^{\circ} dias} |\min diário_{E+} - \min diário_H|}{n^{\circ} dias} \quad (53)$$

Em termos médios, o erro nos valores máximos e mínimos diários entre o *EnergyPlus* e o método horário, durante os períodos do ano fora das estações de aquecimento e arrefecimento, é de, respetivamente, 0,89 °C e 0,72 °C. Apesar da ordem de grandeza deste valor, a sua aceitabilidade dependerá do nível de exigência de cada aplicação.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho visou a análise comparativa das necessidades anuais de energia para aquecimento e arrefecimento de uma habitação, calculadas através de três métodos apresentados pela norma EN ISO 13790 para climas de Portugal (Algarve, Grande Lisboa e Alto Trás-os-Montes) e soluções construtivas tipicamente portuguesas. Os métodos foram construídos e adaptados para que as diferenças entre eles fossem minoradas, através da utilização dos mesmos dados climáticos e das mesmas condições fronteira.

Analizou-se, ainda, o comportamento da temperatura do ar interior do método horário e da simulação dinâmica, através do *EnergyPlus*, para a região do Algarve.

Os resultados deste trabalho, apresentados no capítulo 5, permitem retirar as seguintes conclusões:

- ▶ Os resultados obtidos para as necessidades anuais de energia para aquecimento permitem concluir que, independentemente do método utilizado, os valores não diferem, significativamente, mesmo quando na construção desses métodos se desprezam os ganhos solares através da envolvente opaca ou a transferência de calor por transmissão para o solo;
- ▶ As diferenças entre os métodos são notoriamente mais visíveis para as necessidades de energia para arrefecimento, sobretudo porque o método sazonal apresenta resultados sobrestimados devido à utilização da temperatura média do ar exterior para o cálculo das parcelas de transferência de calor linear;
- ▶ Os métodos têm uma sensibilidade similar à troca de solução construtiva, quer para as necessidades de aquecimento, quer para as de arrefecimento. A sensibilidade do *EnergyPlus* em relação aos ganhos solares através da envolvente opaca é mais acentuada do que nos outros métodos, sobretudo para as regiões de climas mais ameno de Portugal, no cálculo das necessidades de aquecimento e arrefecimento. Numa habitação onde se desprezem as trocas de calor para o solo, o *EnergyPlus* é o método que apresenta uma menor sensibilidade para as necessidades de aquecimento e uma maior sensibilidade para as necessidades de arrefecimento;
- ▶ Na análise comparativa dos resultados da variação diária da temperatura do ar interior para o método horário e para o *EnergyPlus* verificou-se, para o Algarve, que o método horário apresenta limitações na modelação desta variável, uma vez que se observam maiores amplitudes térmicas,

com um erro médio nos máximos e mínimos diários em relação ao *EnergyPlus*, durante os períodos do ano fora das estações de aquecimento e arrefecimento, de 0,89 °C e 0,72 °C, respetivamente. Esta diferença deve-se sobretudo à simplificação considerada no método horário relativamente à massa térmica, uma vez que nos cálculos efetuados esta é concentrada apenas numa única capacitância.

De um modo geral, conclui-se que, em termos de aplicabilidade dos métodos, qualquer um pode ser usado para o cálculo das necessidades anuais de energia de uma habitação, uma vez que os resultados obtidos são similares. Para estudos onde se pretende conhecer a variação diária da temperatura do ar interior de uma habitação, as opções são mais reduzidas, na medida em que o método sazonal não permite modelar a temperatura e o método horário apresenta limitações devidas à inércia térmica uma vez que, neste último caso, se observam maiores amplitudes térmicas relativamente ao *EnergyPlus*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EN ISO 13790. (2008) – *Energy Performance of Building - Calculation of energy use for space heating and cooling*.

Diretiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios.

Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios.

Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de Agosto, Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, N.º 159 – 20 de Agosto de 2013 (Diário da República – 1ª Série 2013).

Despacho n.º 15793-E/2013, N.º 234 – 3 de Dezembro de 2013 (Diário da República, 2ª Série 2013).

Despacho n.º 15793-F/2013, N.º 234 – 3 de Dezembro de 2013 (Diário da República, 2ª Série 2013).

Despacho n.º 15793-I/2013, N.º 234 – 3 de Dezembro de 2013 (Diário da República, 2ª Série 2013).

Despacho n.º 15793-K/2013, N.º 234 – 3 de Dezembro de 2013 (Diário da República, 2ª Série 2013).

Aguiar, R. (2013). Climatologia e Anos Meteorológicos de Referência para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios (versão 2013). Relatório para ADENE. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P., Lisboa.

Kim, Y.-J., Yoon, S.-H., & Park, C.-S. (2013). *Stochastic comparison between simplified energy calculation and dynamic simulation*.

Construção Magazine (2012). Energuia – Guia de eficiência energética nos edifícios.

EnerBuilding.eu (2008). Eficiência energética nos edifícios residenciais.

Jacinto, J. (2014). Metodologias de cálculo das necessidades de aquecimento na ISO 13790.

Kokogiannakis, G., Clarke, J., Strachan, P. (2007). *Impact of using different models in practice – A case study with the simplified methods of ISO 13790 standard and detailed modelling programs*.

Santos, C. (2015). Validação do método horário simplificado – 5R1C com base em medidas e simulações realizadas no *software EnergyPlus*.

Letras, S. (2014). Necessidades nominais de energia em edifícios de habitação: comparação entre as metodologias do RCCTE, REH e modelo 5R1C.

ANEXO A

TABELA 12

Necessidades anuais de energia para aquecimento de todos os modelos para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada, em (kWh/m²).

Modelo	Método	Solução construtiva inicial			Solução construtiva melhorada		
		Algarve	Grande Lisboa	Alto Trás-os-Montes	Algarve	Grande Lisboa	Alto Trás-os-Montes
Base	Horário	32.5	41.9	111.7	18.7	25.5	74.9
	EnergyPlus	30.5	41.7	114.8	15.4	22.9	70.9
	Sazonal	33.2	42.5	119.3	18.5	24.4	75.2
Sem ganhos solares opacos	Horário	43.0	53.3	128.9	24.4	31.7	84.6
	EnergyPlus	44.6	57.1	137.8	22.7	31.2	83.5
	Sazonal	46.4	57.4	142.8	24.8	31.8	88.0
Pavimento adiabático	Horário	23.9	31.9	90.8	10.7	15.5	53.1
	EnergyPlus	26.3	35.4	99.2	12.0	17.7	56.4
	Sazonal	23.6	30.9	93.0	10.2	14.1	49.7

TABELA 13

Necessidades anuais de energia para arrefecimento de todos os modelos para os diferentes métodos e climas em estudo numa habitação com solução construtiva inicial e solução construtiva melhorada, em (kWh/m²).

Modelo	Método	Solução construtiva inicial			Solução construtiva melhorada		
		Algarve	Grande Lisboa	Alto Trás-os-Montes	Algarve	Grande Lisboa	Alto Trás-os-Montes
Base	Horário	36.9	24.0	24.4	36.7	26.6	25.6
	EnergyPlus	37.4	23.4	21.6	32.7	22.9	19.7
	Sazonal	47.7	33.3	30.4	43.6	32.8	30.5
Sem ganhos solares opacos	Horário	17.9	7.2	10.5	23.7	14.2	15.4
	EnergyPlus	13.3	3.5	4.8	17.3	8.6	8.4
	Sazonal	21.0	11.0	9.8	28.0	18.6	17.1
Pavimento adiabático	Horário	41.4	29.5	28.6	42.0	33.3	31.5
	EnergyPlus	46.8	33.6	30.6	42.9	33.5	30.2
	Sazonal	51.5	38.4	35.5	47.5	38.3	36.1

ANEXO B

TABELA 14

Diferenças entre os resultados das necessidades de aquecimento dos métodos simplificados e do *EnergyPlus*, em (kWh/m²).

Modelo	Variação absoluta entre os métodos simplificados e o <i>EnergyPlus</i>	Solução construtiva inicial			Solução construtiva melhorada		
		Algarve	Grande Lisboa	Alto Trás-os-Montes	Algarve	Grande Lisboa	Alto Trás-os-Montes
Base	H-EP	2.00	0.17	-3.06	3.34	2.63	3.98
	S-EP	2.66	0.79	4.57	3.13	1.53	4.26
Sem ganhos solares opacos	H-EP	-1.62	-3.79	-8.88	1.70	0.53	1.16
	S-EP	1.77	0.30	4.98	2.11	0.62	4.53
Pavimento adiabático	H-EP	-2.45	-3.58	-8.40	-1.38	-2.25	-3.33
	S-EP	-2.74	-4.56	-6.14	-1.80	-3.63	-6.73

TABELA 15

Diferenças entre os resultados das necessidades de arrefecimento dos métodos simplificados e do *EnergyPlus*, em (kWh/m²).

Modelo	Variação absoluta entre os métodos simplificados e o <i>EnergyPlus</i>	Solução construtiva inicial			Solução construtiva melhorada		
		Algarve	Grande Lisboa	Alto Trás-os-Montes	Algarve	Grande Lisboa	Alto Trás-os-Montes
Base	H-EP	-0.44	0.62	2.80	4.00	3.62	5.82
	S-EP	10.31	9.92	8.79	10.89	9.89	10.77
Sem ganhos solares opacos	H-EP	4.59	3.69	5.72	6.39	5.65	7.02
	S-EP	7.68	7.49	5.00	10.72	9.99	8.70
Pavimento adiabático	H-EP	-5.41	-4.01	-1.92	-0.85	-0.13	1.31
	S-EP	4.64	4.85	4.96	4.63	4.88	5.85

ANEXO C

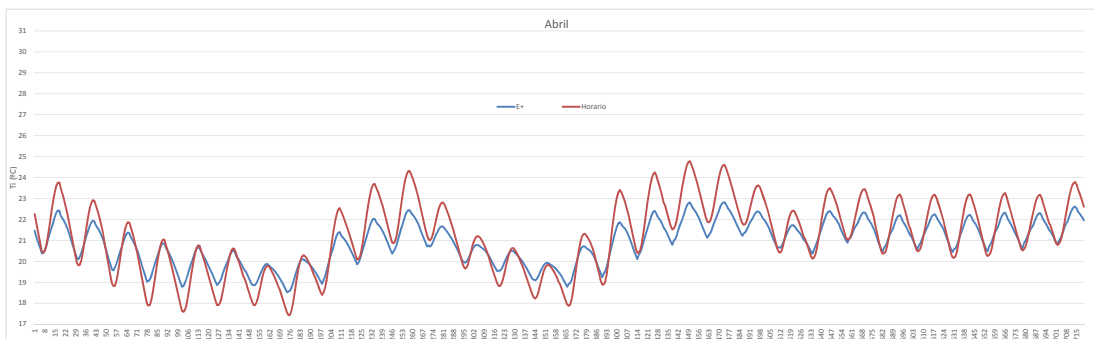


FIGURA 23 – Temperatura interior (°C) - método horário e *EnergyPlus* – Mês de abril

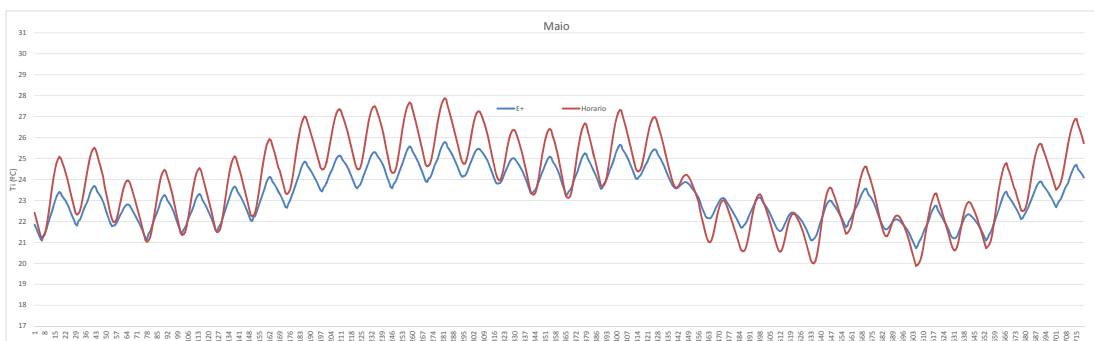


FIGURA 24 – Temperatura interior (°C) - método horário e *EnergyPlus* – Mês de maio

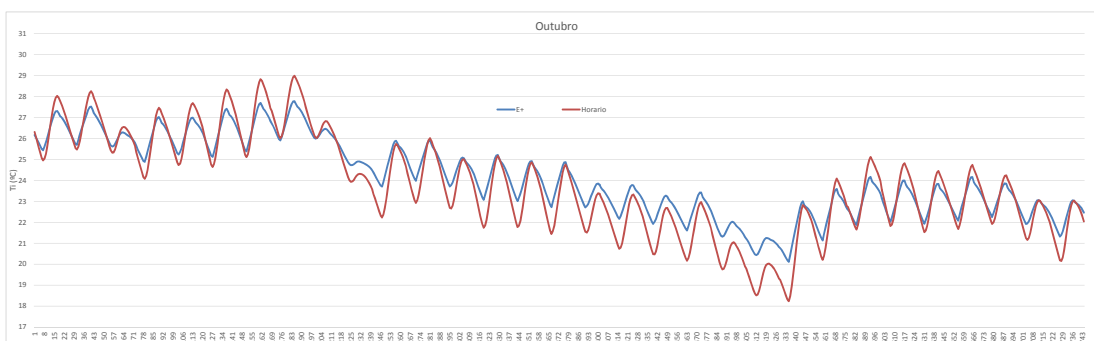


FIGURA 25 – Temperatura interior (°C) - método horário e *EnergyPlus* – Mês de outubro

